

Б. І. Мокін, М. П. Розводюк



**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ
ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
СИСТЕМ МІСЬКИХ ТРАМВАЇВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Б.І. Мокін, М.П. Розводюк

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ
ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
МІСЬКИХ ТРАМВАЇВ**

Монографія

УНІВЕРСУМ – Вінниця
2005

УДК 656(1-21):681.5+658.58
М74

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №4 від 25.11.2004 р.).

Рецензенти:

д.т.н., професор Д.Й. Родькін (Кременчуцький державний політехнічний університет, м. Кременчук),
д.т.н., доцент В.В. Грабко (Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця)

Мокін Б.І., Розводюк М.П.

М74 Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв.
Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 126 с.

ISBN 966-641-106-7

В монографії представлені розроблені авторами математичні моделі для вдосконалення методів оцінки технічного стану, відновлення основних електротехнічних систем трамваїв та синтезовані на їхній основі системи технічної діагностики тягового електродвигуна й прискорювача трамвая.

Розрахована на інженерно-технічних працівників трамвайно-тролейбусних управлінь, а також може бути корисною студентам та аспірантам вузів, котрі спеціалізуються в галузі математичного моделювання та технічної діагностики міського електротранспорту.

УДК 656(1-21):681.5+658.58

ISBN 966-641-106-7

© Б.І. Мокін, М.П. Розводюк, 2005

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	6
Вступ.....	7
Розділ 1 Аналіз наукових розробок з питань оцінки й відновлення технічного стану функціональних систем засобів міського електротранспорту і постановка задач дослідження	9
1.1. Аналіз несправностей функціональних систем трамваїв і тролейбусів	11
1.2. Аналіз наукових підходів до питань оцінки технічного стану функціональних систем засобів міського електротранспорту	14
1.2.1. Підхід до визначення оцінки технічного стану вагона методами розпізнавання образів	14
1.2.2. Підхід до визначення оцінки технічного стану об'єкта з використанням імітаційного моделювання	15
1.2.3. Аналіз математичних моделей оцінки працездатності основних функціональних систем засобів міського електротранспорту	15
1.2.4. Аналіз способів діагностування технічного стану основних вузлів електротранспорту	17
1.3. Аналіз наукових розробок з питань відновлення функціональних систем засобів міського електротранспорту	21
1.3.1. Організація поповнення запасу	21
1.3.2. Аналіз математичних моделей для розрахунку запасних частин.....	23
1.4. Постановка задач дослідження	26
1.5. Висновки	26
Розділ 2 Синтез математичних моделей для оцінки технічного стану основних електротехнічних функціональних систем міських трамваїв, що забезпечують їх рух.....	28
2.1. Синтез математичної моделі для оцінки технічного стану тягового електричного двигуна.....	28

2.1.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження	28
2.1.2. Синтез математичної моделі визначення залишкового ресурсу тягового електродвигуна за станом ізоляції обмотки якоря	28
2.2. Синтез математичної моделі оцінки технічного стану прискорювача трамвая	32
2.2.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження	32
2.2.2. Розробка математичної моделі функціонування прискорювача	35
2.3. Висновки	37
Розділ 3 Синтез математичних моделей для оцінки рівня кваліфікації водіїв трамваїв	38
3.1. Синтез математичних моделей емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями на маршрутах	38
3.1.1. Постановка задачі.....	38
3.1.2. Побудова математичної моделі споживання електроенергії трамваями за годину	39
3.1.3. Побудова математичної моделі споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу	45
3.2. Синтез математичних моделей для оцінки споживання електроенергії трамваями на маршрутах.....	48
3.2.1. Постановка задачі.....	48
3.2.2. Синтез математичних моделей	50
3.3. Висновки	58
Розділ 4 Синтез математичних моделей для оцінки працездатності функціональних систем міських трамваїв та розрахунку запасних частин для їх відновлення.....	59
4.1. Синтез математичних моделей для оцінки працездатності функціональних систем трамваїв	59
4.1.1. Виведення розрахункових співвідношень та побудова алгоритму синтезу моделей.....	59
4.1.2. Синтез моделей оцінок характеристик працездатності функціональних систем трамваїв	64

4.2. Синтез математичних моделей для розрахунку запасних комплектів основних функціональних систем трамваїв	67
4.2.1. Математичні моделі для визначення резервів запасних частин основних функціональних систем трамваїв без врахування імовірності відновлення систем.....	68
4.2.2. Математичні моделі для визначення резервів запасних частин основних функціональних систем трамваїв з врахуванням імовірності відновлення систем.....	71
4.2.2.1. Постановка задачі	71
4.2.2.2. Побудова розрахункових співвідношень	73
4.2.2.3. Приклад розрахунку запасних частин для релейно-контакторної системи трамваїв	74
4.3. Висновки	78
Розділ 5 Синтез структур систем технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв з використанням запропонованих моделей ...	
5.1. Синтез структури системи технічної діагностики електричного двигуна	79
5.2. Практична реалізація синтезованої структури.....	89
5.3. Розробка питань вдосконалення системи технічної діагностики електричного двигуна	95
5.4. Синтез структури системи технічної діагностики прискорювача трамвая.....	97
5.5. Висновки	107
Висновки	108
Додатки.....	119
Додаток А. Моделі оцінок характеристик працездатності основних функціональних систем трамваїв	120
Додаток Б. Результати розрахунків визначення резервів запасних комплектів для основних функціональних систем трамваїв.....	126

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	—	аналоого-цифровий перетворювач
БУН	—	блок установки нуля
ВС	—	високовольтна система
ГС	—	гальмівна система
Д	—	двері
ДВ	—	двигун-вентилятор
ДГ	—	двигун-генератор
ДЧ	—	дільний частоти
ЕОМ	—	електронно-обчислювальна машина
ЗК	—	задавач коду
ЗР	—	задавач ресурсу
ЗЧ	—	запасна частина
ЗШЗТ	—	задавач швидкості зміни температури
НП	—	нормуючий перетворювач
НС	—	низьковольтна система
ОЕОМ	—	однокристална мікро-ЕОМ
П	—	прискорювач
ПЕОМ	—	персональна електронно-обчислювальна машина
ПН	—	перетворювач напруги
ПС	—	пневматична система
РКС	—	релейно-контакторна система
РТ	—	розподільник тактів
СК	—	система керування
СС	—	сенсор струму
СТ	—	сенсор температури
ТД	—	тяговий двигун
ТТУ	—	трамвайно-тролейбусне управління
ФБ	—	функціональний блок
ФП	—	функціональний перетворювач
ФС	—	функціональна система
ЦАП	—	цифро-аналоговий перетворювач

ВСТУП

Якість обслуговування населення міським електротранспортом у містах України не відповідає сучасним вимогам. Таке становище викликане тим, що трамвайно-тролейбусні парки старіють, а коштів на придбання нових одиниць рухомого складу в трамвайно-тролейбусних управліннях (ТТУ) не вистачає.

В зв'язку з цим постає питання отримання об'єктивної інформації про працездатність міського електротранспорту, зокрема оцінки та прогнозування зміни технічного стану його основних функціональних систем (ФС).

Слід зазначити, що як в Україні, так і в країнах колишнього СРСР проблемам надійності роботи засобів міського електротранспорту увага з боку вчених приділяється менше, ніж тим засобам, які задіяні в технологічних та виробничих процесах. Тож сьогодні діагностуванням трамваїв та тролейбусів займаються практично лише в міських трамвайних та тролейбусних депо на рівні впровадження рацпропозицій, а ґрунтовних досліджень проблем, пов'язаних із забезпеченням надійності трамваїв та тролейбусів в Україні не проводиться.

Тому побудова математичних моделей для оцінки технічного стану та відновлення ФС трамваїв, як одного із основних видів міського електротранспорту є задачею актуальною як в науковому плані, так і в плані підвищення ефективності транспортного обслуговування населення.

В книзі викладені математичні моделі для вдосконалення методів оцінки технічного стану та відновлення основних електротехнічних систем трамваїв та синтезовані на їхній основі системи технічної діагностики тягового електродвигуна й прискорювача трамвая.

Практична цінність одержаних результатів полягає в тому, що впровадження запропонованих моделей та систем технічної діагностики дозволяє підвищити ефективність транспортного обслуговування населення міста та зменшити його енергоємність.

Математичні моделі та системи діагностування розроблені для умов роботи трамваїв у Вінницькому ТТУ, але легко адаптуються і до умов роботи трамваїв в ТТУ інших міст України.

Книга містить п'ять розділів.

Перший розділ присвячено аналізу відомих математичних моделей оцінки технічного стану й відновлення функціональних систем електротранспорту та обґрунтуванню необхідності пошуку нових рішень у цій галузі.

В другому розділі обґрунтовано математичну модель, що здатна визначити залишковий ресурс тягового електродвигуна за станом ізо-

ляції його обмотки якоря. Обрано й обґрунтовано математичний апарат, адекватний процесові функціонування прискорювача трамвая, на основі якого синтезовані математичні моделі функціонування й оцінки технічного стану даної системи.

У третьому розділі досліджено процеси споживання електроенергії трамваями на маршрутах та вплив рівня кваліфікації водіїв трамваїв на кількість споживання ними електроенергії.

У четвертому розділі запропонований новий підхід до синтезу математичних моделей оцінок характеристик працездатності функціональних систем трамваїв і алгоритм його реалізації з використанням авторегресійних залежностей, на основі яких синтезовано математичні моделі ймовірності безвідмовної роботи й інтенсивності відмов основних ФС трамваїв. Узагальнено метод розрахунку обсягу запасних комплектів.

У п'ятому розділі синтезовано структури систем технічної діагностики тягового електродвигуна та прискорювача трамвая на основі розроблених секвенційної й логіко-математичної моделей відповідно.

Текст книги написаний М.П. Розводюком по матеріалах його кандидатської дисертації, постановка задачі в якій і керівництво дослідженнями здійснювалось професором Б.І. Мокіним. Б.І. Мокіним здійснено і загальне редагування книги.

Відгуки, зауваження і побажання просимо надсилати за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Видавництво ВНТУ „УНІВЕРСУМ-Вінниця”.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОЗРОБОК З ПИТАНЬ ОЦІНКИ Й ВІДНОВЛЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ ЗАСОБІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Склад та структура рухомого складу електротранспорту Вінницького ТТУ за даними Вінницького обласного управління статистики [1] подані в табл. 1.1, табл. 1.2 та на рис. 1.1, рис. 1.2. Як видно з приве-

Таблиця 1.1

Наявність рухомого складу електротранспорту Вінницького ТТУ

Електротранспорт	Роки					
	1995 р.	1997 р.	1998 р.	1999 р.	2000 р.	2001р.
Тролейбуси, од.	175	168	153	153	151	153
Трамваї, од.	115	114	105	105	105	111

Таблиця 1.2

Структура рухомого складу електротранспорту Вінницького ТТУ
за роками випуску станом на кінець 2001 року

Електротранспорт	Всього	у тому числі з моменту випуску заводом-виробником			
		до 5 років	5-10 років	10-15 років	від 15 років і більше
Тролейбуси, %	100	—	27,4	39,2	33,4
Трамваї, %	100	—	—	32,4	67,6

дених даних, оновлення рухомого складу електротранспорту не спостерігається. Відбувається лише їх відновлення, яке супроводжується зменшенням робочого ресурсу через фізичне старіння вагонів.

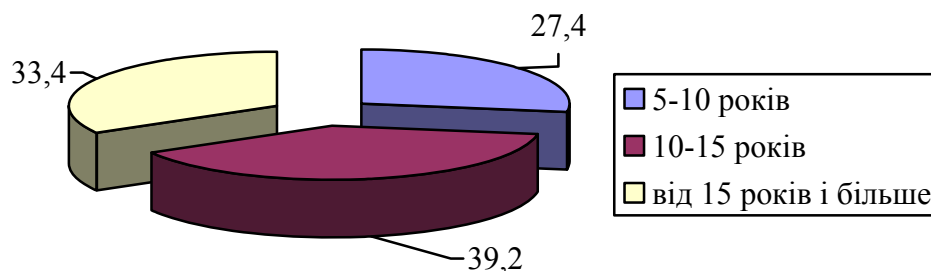


Рис. 1.1. Діаграма віку тролейбусів Вінницького ТТУ станом на кінець 2001 року

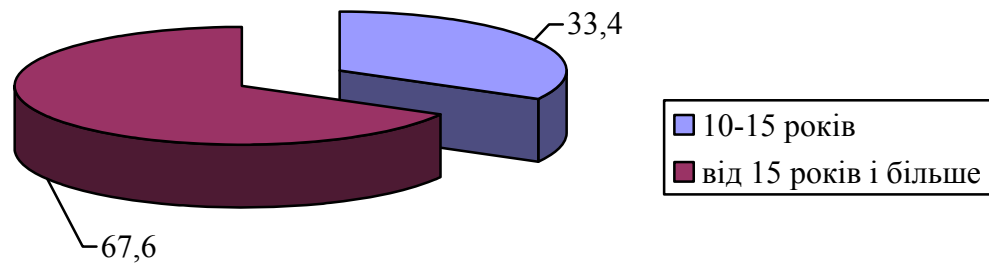


Рис. 1.2. Діаграма віку трамваїв Вінницького ТТУ станом на кінець 2001 року

Ця тенденція пояснюється тим, що вартість трамваїв та тролейбусів досить висока, а тому ТТУ за власні кошти просто неспроможне здійснити закупівлю нових одиниць електротранспорту.

Існуючу триступінчасту систему технічного обслуговування трамваїв і тролейбусів при деяких відмінностях в періодичності, об'ємах робіт і назвах можна привести до такої схеми [2]: щоденне обслуговування (ЩО) – один раз на добу; технічне обслуговування № 1 (ТО-1) – один раз на 3–7 діб; технічне обслуговування № 2 (ТО-2) – через 16–18 тис. км. пробігу. При цьому задача зводиться до обґрунтування, вибору і оптимізації систем технічного обслуговування, ремонту функціональних систем трамваїв і тролейбусів та їх елементів. Така задача розкладається на дві задачі: обґрунтування строків проведення технічного обслуговування і ремонту окремих частин системи і наступного їх групування в комплекси [3].

Розглянуті система і організація технічного обслуговування трамваїв і тролейбусів мають ряд суттєвих недоліків: 1) простої ремонтного персоналу на ТО-1 на початку і в кінці робочої зміни; 2) низький коефіцієнт використання робочого часу ремонтним персоналом в період, коли машини знаходяться на місцях ТО-1; 3) невинновдані в ряді випадків затрати матеріальних і трудових ресурсів на монтаж – демонтаж і ремонт агрегатів, які мають остаточний ресурс на момент постановки машини в ТО-2.

Повний вияв несправностей технічних пристроїв під час технічного обслуговування або під час ремонту практично неможливий [3]. Як наслідок – зниження якості технічного обслуговування і ремонту та ріст потоку відмов при подальшій експлуатації електротранспорту.

За таких обставин одним з можливих способів покращення надійності та ефективності функціонування трамваїв і тролейбусів є побудова математичних моделей та систем для оцінки і відновлення технічного стану їх ФС.

Техніко-економічний аналіз підтверджує, що контрольно-

діагностичне обладнання дозволяє підвищити надійність і безпечність роботи трамваїв та тролейбусів на лінії, а значить, покращити обслуговування пасажирів найбільш економічним способом [4].

1.1. Аналіз несправностей функціональних систем трамваїв і тролейбусів

ФС та більшість важливих вузлів засобів електротранспорту працюють в надзвичайно складних умовах [5], викликаних як технічними факторами, так і людськими. А як наслідок, маємо велику кількість виходів з ладу як окремих вузлів, так і ФС в цілому.

В роботі [6] досліджено, що на вінницьких трамваях в 1998 році було за рік зафіксовано 2503 несправностей, а на тролейбусах в 1999 році – 4612. В цій же роботі [6] встановлено, що в перерахунку на один трамвай припадає 22,15 несправностей, а в перерахунку на один тролейбус – 25,62 несправності на рік.

В зв'язку з тим, що як трамвай, так і тролейбус в своїй конструкції мають велику номенклатуру деталей, яких окремо одна від іншої розглядати практично неможливо [3], для дослідження і контролю виділимо основні ФС для трамваїв і тролейбусів.

В роботах [5, 6] в якості окремих ФС трамваїв та тролейбусів виділено:

- 1) гальмівну систему (ГС);
- 2) тягові двигуни (ТД);
- 3) високовольтну систему (ВС);
- 4) низьковольтну систему (НС);
- 5) релейно-контакторну систему (РКС);
- 6) двері (Д).

Крім того, для трамваїв окремо виділено як 7-му ФС двигун-генератор (ДГ), який містить в собі одночасно і високовольтні і низьковольтні елементи, та вичленено із РКС окремо прискорювач (П) в якості 8-ої ФС.

А для тролейбусів додатково до перших шести спільних з трамваем ФС в якості 7-ої ФС виділено двигун-вентилятор (ДВ), в якості 8-ої ФС – систему керування (СК) та в якості 9-ої ФС – пневматичну систему (ПС).

На діаграмі (рис. 1.3) показано як співвідносяться між собою несправності усіх виділених восьми ФС вінницьких трамваїв в долях від загальної кількості цих несправностей, що мала місце за даними Вінницького трамвайно-тролейбусного управління (ТТУ) в 1998 році [5].

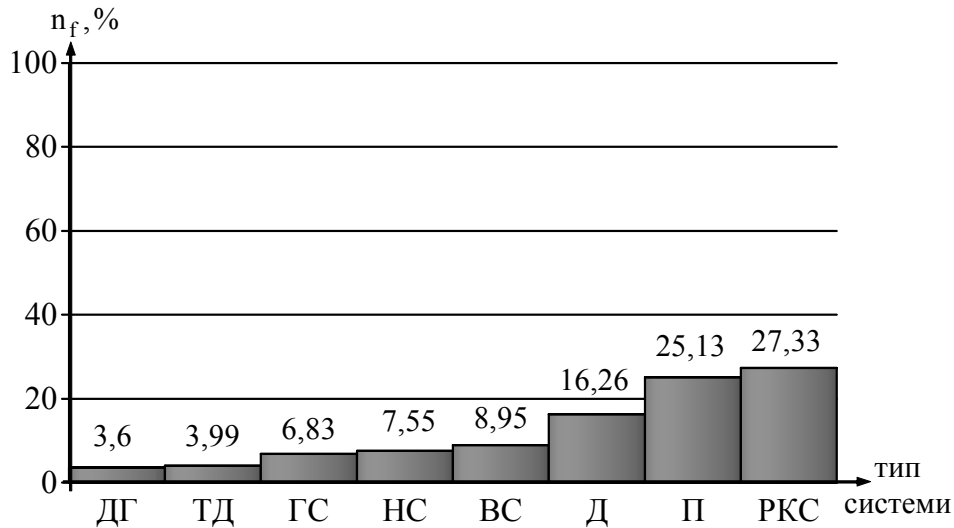


Рис. 1.3. Діаграма вмісту несправностей ФС трамваїв в загальній кількості цих несправностей за рік (у відсотках)

На аналогічній діаграмі (рис. 1.4) показано як співвідносяться між собою несправності усіх виділених дев'яти ФС вінницьких тролейбусів в долях від загальної кількості цих несправностей, що мала місце за даними Вінницького ТТУ в 1999 році [7].

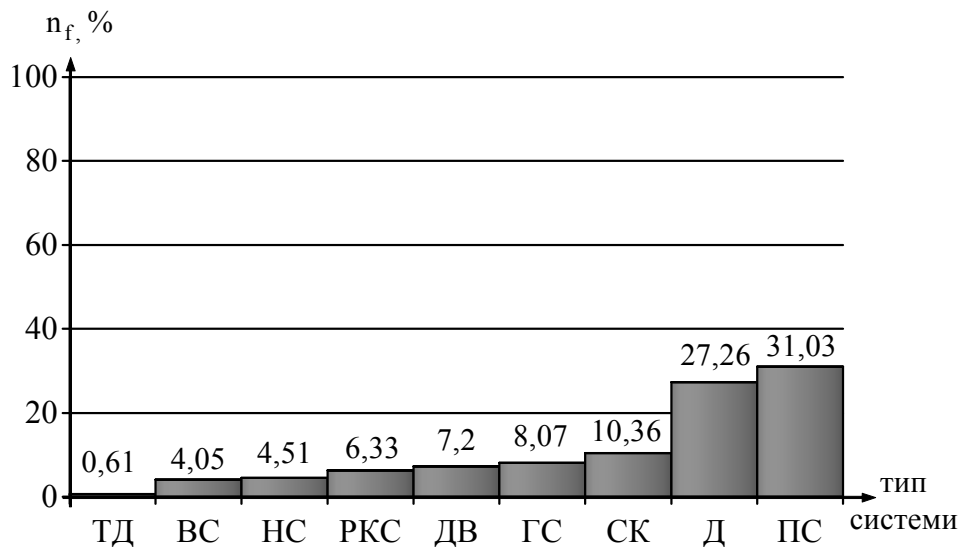


Рис. 1.4. Діаграма вмісту несправностей ФС тролейбусів в загальній кількості цих несправностей за рік (у відсотках)

В роботі [7] побудовані емпіричні закони розподілу несправностей основних ФС трамваїв, згідно якої несправності ГС, РКС, ВС, НС, ТД, Д та П трамваїв апроксимуються нормальним законом розподілу, а несправності ДГ – нормальним логарифмічним законом розподілу.

В роботі [6] побудовані емпіричні закони розподілу несправностей

основних ФС тролейбусів, згідно якої несправності ГС, РКС, НС, СК, ТД, ДВ та Д тролейбусів апроксимуються нормальним законом розподілу, а несправності ВС та ПС – нормальним логарифмічним законом розподілу. Підтвердження правильності побудови цих законів можна знайти в роботі [8].

Кількість несправностей та їх статистичні оцінки для кожної з ФС трамваїв і тролейбусів згідно робіт [6-8] наведені в табл. 1.3 і табл. 1.4 відповідно.

Таблиця 1.3

Статистичні оцінки несправностей ФС трамваїв за період з 01.01.1997 р. по 31.08.1997 р. та з 01.01.1998 р. по 31.08.1998 р.

Системи	Параметри		
	Середнє значення	Дисперсія	Середньоквадратичне відхилення
РКС	54,563	273,871	16,549
ГС	17,5	31,875	5,646
ТД	10,5	9,25	3,041
ДГ	10,946	10,935	3,307
П	51,125	144,734	12,031
Д	36,188	129,777	11,392
ВС	23,75	68,938	8,303
НС	16,625	22,484	4,742

Таблиця 1.4

Статистичні оцінки несправностей ФС тролейбусів за період з 01.01.1999 р. по 31.08.1999 р. та з 01.01.2000 р. по 31.08.2000 р.

Системи	Параметри		
	Середнє значення	Дисперсія	Середньоквадратичне відхилення
РКС	23,571	71,531	8,458
ГС	27,857	89,551	9,463
ТД	2,5	0,821	0,906
ДВ	30,357	59,944	7,742
СК	38,571	169,8	13,03
Д	87,57	789,25	28,09
ВС	10,13	8,502	2,916
НС	17,64	35,94	6
ПС	19,53	5,52	2,35

1.2. Аналіз наукових підходів до питань оцінки технічного стану функціональних систем засобів міського електротранспорту

1.2.1. Підхід до визначення оцінки технічного стану вагона методами розпізнавання образів

Узагальнення цього напрямку здійснено в роботі [9].

Суть напрямку полягає в наступному. Нехай вагон складається з m функціональних блоків. Множина можливих станів вагону α може бути розбита, наприклад, на класи:

$$\varepsilon = \{\varepsilon_0, \varepsilon_1, \dots, \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_m\}, \quad (1.1)$$

де ε – клас несправних станів;

ε_i – клас несправних станів, які викликані відмовою i -го функціонального елемента.

Тепер нехай інформація про кожен стан об'єкта поступає на вхід розпізнавального пристрою у вигляді сукупності сигналів, які утворюють вхідне зображення. Припускається, що кожному конкретному стану об'єкта відповідає зображення у вигляді вектора

$$\xi = |\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_m|^T, \quad (1.2)$$

де T – знак транспонування.

Компонентами вектору ξ є відповідним чином сформовані ознаки ξ_i . При розпізнаванні стану вагону в якості ознак звичайним є прийняття значення інтегральних параметрів функціональних блоків або деякі функції від них. В найбільш простому випадку в якості ознаки ξ_i може бути використаний факт виходу контрольованого параметра y_i за межі допуску Δ_i . При цьому стан вагону буде описуватись сукупністю двійкових (бінарних) ознак:

$$\xi_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_{iB} > \Delta_i; \\ -1, & \text{якщо } y_{iH} < \Delta_i, \end{cases} \quad (1.3)$$

де $y_{iB, iH}$ – верхнє і нижнє допустиме значення параметра.

При бінарних ознаках об'єм роботи розпізнавальної системи різко зменшується, причому заміна неперервних ознак бінарними у більшості випадків не погіршує якості розпізнавання.

Такий підхід діагностування вагонів дозволяє перейти від визначення технічного стану вагону в даний момент часу до прогнозування стану через деякий проміжок часу. Для реалізації підходу необхідно мати конкретні математичні моделі, які зв'язують простір ознак з про-

стором станів кожної ФС, та засоби вимірювання значень цих ознак.

1.2.2. Підхід до визначення оцінки технічного стану об'єкта з використанням імітаційного моделювання

В роботі [10] припускається, що технічний пристрій може працювати в двох режимах: I і II, а за базовий вибрано режим зберігання, в якому пристрій знаходиться в постійній готовності до використання. Режиму I відповідає проведення контрольних і підготовчих операцій для забезпечення роботи в режимі II, тобто режим I передуює режиму II.

З врахуванням таких передумов в роботі [10] визначено імовірність безвідмовної роботи на кожному з інтервалів:

$$R(t_I) = 1 - \frac{t_{\text{нег}}^I}{T_e - (T_{\text{II}} + T_{\text{нп}})}; \quad (1.4)$$

$$R(t_{II}) = 1 - \frac{t_{\text{нег}}^{II}}{T_e - (T_{\text{II}} + T_{\text{нп}})}, \quad (1.5)$$

де $t_{\text{нег}}^I, (t_{\text{нег}}^{II})$ – сумарний час, при якому система втрачає працездатність за весь термін експлуатації (неготовність системи протягом відповідного часу виконати свої функції) на першому (другому) режимі функціонування;

T_e – час експлуатації;

T_{II} – сумарний час проведення планового технічного обслуговування системи за весь термін експлуатації;

$T_{\text{нп}}$ – сумарний час усунення несправностей системи за весь термін експлуатації.

Цей підхід доцільно використовувати лише на верхньому рівні планування і оцінки ефективності функціонування ТТУ в цілому.

1.2.3. Аналіз математичних моделей оцінки працездатності основних функціональних систем засобів міського електротранспорту

В якості оцінок працездатності ФС трамваїв та тролейбусів розглядатимемо інтенсивності їх відмов λ та імовірності безвідмовної роботи R , які визначатимемо як функції часу, тобто $\lambda(t)$, $R(t)$.

Як відомо [11-18], якщо n_0 однакових елементів працюють в однакових умовах протягом часу t , то оцінки таких їх характеристик, як $R(t)$ та $\lambda(t)$, можна знайти за допомогою виразів

$$R(t) = \frac{n_s(t)}{n_0} = \frac{n_0 - n_f(t)}{n_0}, \quad (1.6)$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}, \quad (1.7)$$

де $n_f(t)$ – кількість елементів, які протягом проміжку часу t вийшли з ладу;

$n_s(t)$ – кількість елементів, які зберегли працездатність, за умови звичайно, що

$$n_f(t) + n_s(t) = n_0. \quad (1.8)$$

Модель зв'язку між характеристиками $R(t)$ та $\lambda(t)$, як відомо [11-18], можна, виходячи з виразу (1.7), подати і в іншій формі, а саме

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}. \quad (1.9)$$

Крім того, відомо [11], що в разі, якщо об'єкт має n незалежних ФС, вихід з ладу кожної i -тої із яких призводить до виходу з ладу і об'єкта в цілому. Імовірність безвідмовної роботи для такого об'єкта можна оцінити за допомогою виразу

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t). \quad (1.10)$$

Особливо просто за допомогою формул (1,9), (1,10) знаходяться оцінки імовірності безвідмовної роботи об'єкта в разі, якщо потік відмов кожної з його систем є пуасонівським, оскільки в цьому випадку інтенсивність відмов $\lambda_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ є константою, тобто

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= \lambda_i, \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

а імовірність безвідмовної роботи $R_i(t)$ кожної i -тої системи підпорядковується експоненціальному закону, тобто

$$\begin{aligned} R_i(t) &= e^{-\lambda_i t}, \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1.12)$$

що приводить до моделі об'єкта у формі імовірності безвідмовної роботи вигляду

$$R(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} \quad (1.13)$$

Як бачимо із наведених виразів, у разі, якщо із експериментальних даних нам вдалося отримати одну із характеристик працездатності кожної ФС об'єкта $\lambda_i(t)$ чи $R_i(t)$, то розрахунок другої, а також обох їх для об'єкта в цілому здійснюється елементарно і на інженерному рівні не складає предмета наукового дослідження.

Розглянуті вище математичні моделі мають суттєвий недолік – вони не враховують такого фактору, як заміна відмовленого елемента деякої системи новим або післяремонтним. При цьому отримуємо випадкове сполучення деталей з різними залишковими ресурсами, що приводить до того, що через один і той же пробіг після ремонту технічний стан систем різний. В такому випадку частина з них відмовляє в міжремонтний період, а інша піддається передчасному ремонту.

Якщо врахувати такі обставини, то розрахунок одразу ускладнюється. Адже в цьому випадку, незважаючи на те, продовжується відлік часу t від раніше вибраного нуля чи встановлюється новий нуль, необхідна корекція моделі інтенсивності відмов $\lambda(t)$, що в свою чергу вимагає додаткового циклу досліджень цієї системи, під час якого вона залишається в стані невизначеності.

Тож пошук нових підходів до побудови моделей $\lambda(t)$ та $R(t)$ ФС продовжує залишатись актуальним, і особливо ж якщо розглядаються ФС трамваїв або тролейбусів, умови експлуатації яких суттєво залежать від пори року та стану погоди.

1.2.4. Аналіз способів діагностування технічного стану основних вузлів електротранспорту

Практично в усіх літературних джерелах, які стосуються електротранспорту, можна зустріти характеристики несправностей того чи іншого вузла. Добре розкрито всі можливі неполадки, шляхи їх виникнення, наслідки і способи їх усунення. Однак, більшість з цих способів дозволяють оцінити стан системи чи її елемента лише при ремонті чи огляді, а не в процесі функціонування.

Розглянемо коротко деякі моменти.

В роботі [4] досить детально описані практично всі можливі несправності, які можуть виникнути в тяговому двигуні, а також причини, які їм передують. В цій же роботі для контролю параметрів зносу колектора використовують пристрій типу „УКИД-М”, для вимірюван-

ня биття колектора – стенд „СИЭ”, для вимірювання радіального зазору в підшипниках – пристрій типу „УИРЛ”, для вимірювання рівня віброактивності – віброметр ВМ-1, для контролю ізоляції – вимірюють її опір. Крім цього використовується візуальний контроль на технічному обслуговуванні з одночасним виконанням профілактичних робіт.

Однак при такому контролі необхідною умовою є демонтаж двигуна.

Крім тягових двигунів в цій же роботі [4] розглянуто діагностування й інших вузлів електричного обладнання (контакторно-реостатні системи управління, струмоприймачі, ізоляцію високовольтних кіл, систему низьковольтного електропостачання), а також вузлів механічного обладнання. Але в основному всі вони потребують демонтажу для перевірки.

В роботі [9] наведено схему (рис. 1.5), яка дозволяє здійснювати діагностування вагону чи окремої його системи як при експлуатації, так і при стендових випробуваннях.

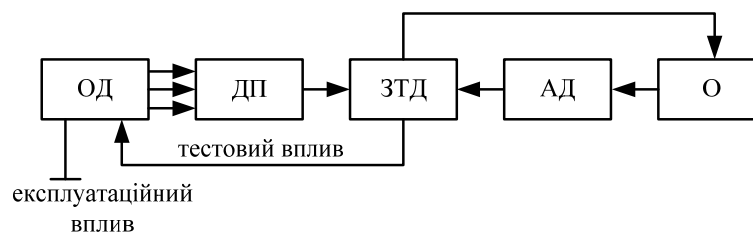


Рис. 1.5. Структурна схема системи діагностування вагонів

На рис. 1.5: ОД – об’єкт діагностування; ДП – діагностичні параметри; ЗТД– засоби технічного діагностування; АД – алгоритм діагностування; О – оператор.

Про технічний стан вагону (ОД) можна судити по діагностичних параметрах, які вимірюються і оцінюються засобами діагностування. Останні відпрацьовують заданий алгоритм діагностування. Інформація із засобів технічного діагностування поступають до оператора для прийняття рішення.

Схема засобів технічного діагностування згідно [9] має вигляд, приведений на рис. 1.6.

На об’єкт діагностування ОД встановлюють сенсори С. Сигнали підсилюються в підсилювачі П і передаються для запису: на магнітофон М, на відеотермінал ВТ, для візуального контролю, а також на аналогово-цифровий перетворювач АЦП, інформація з якого передається на пристрій експрес-аналізу ЕА, в блок зберігання інформації БЗІ і одночасно на електронно-обчислювальну машину ЕОМ, яка

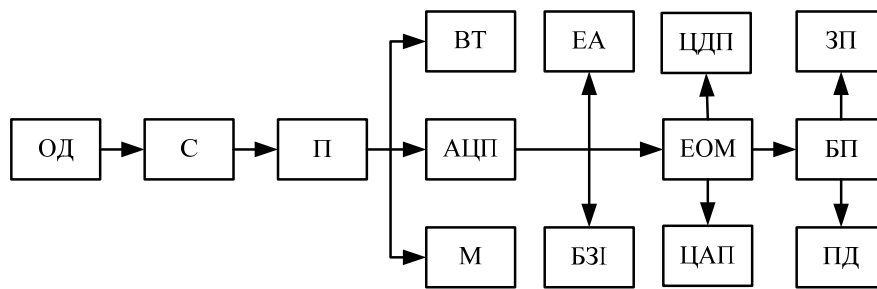


Рис. 1.6. Структурна схема засобів технічного діагностування

здійснює необхідний аналіз діагностичного сигналу, виділяючи найбільш інформативні його частини, і оцінює їх кількісно. Оброблені результати з ЕОМ передаються на цифро-аналоговий перетворювач ЦАП, цифро-друкуючий пристрій ЦДП і на логічний блок порівняння БП, який співставляє по заданому критерію діагностичний сигнал з нормованими значеннями, які зберігаються в задаючому пристрої ЗП. В результаті порівняння формується рішення і передається в блок постановки діагнозу ПД, який інформує про результати діагностування.

В роботі [9] розглянуто структурні схеми для діагностування рухомих частин вагону, протитюзних пристроїв, магнітно-рейкового гальма, електрообладнання вагону, приводів генераторів, комутації. Але діагностування цих пристроїв відбувається при стендових випробуваннях.

На лініях трамвая і тролейбуса процес струмознімання здійснюється в динамічній системі “струмоприймач – контактна підвіска” [19]. Ця система функціонує задовільно, якщо правильно визначені і підтримуються в експлуатації параметри її елементів. Несправності струмоприймачів і контактних підвісок призводять в більшості випадків до відмов системи, і як наслідок, до збоїв в русі. В процесі експлуатації відбуваються також підвищений знос контактних елементів, підвищення радіоперешкод та інші небажані явища. Однією з умов нормальної експлуатації трамваїв і тролейбусів є забезпечення надійного струмознімання за мінімуму відмов контактної мережі і струмоприймачів.

До числа найбільш важливих параметрів мережі, які впливають на струмознімання, відносяться висота і нахил проводів, перегини в точках підвішування, плавність ходової лінії при підходах до спецчастин і на спецчастинах, пороги на ходовій лінії, перекіс клем на проводах, зосереджені і підресорні маси, знос контактних проводів. Всі ці параметри проявляються в процесі струмознімання головним чином через величину контактного натискання [19]

$$P_k = P_{ст} \pm P_d = P_{1,2} \pm (m_T + m_K) \frac{dv}{dt}, \quad (1.14)$$

де $P_{1,2}$ – пасивне і активне статистичне натискання струмоприймача;
 m_T, m_K – приведені маси відповідно струмоприймачів і контактної підвіски;
 $\frac{dv}{dt}$ – прискорення руху головки струмоприймача у вертикальній площині.

Зміна параметрів впливає насамперед на величину P_k , а зосередження маси мережі – на приведену масу підвіски. Прискорення головки залежить від траєкторії і швидкості руху машини.

Контроль більшості параметрів контактної мережі здійснюється, як правило, вручну з пересувних автовишок. Деякі з них, які проявляються в динаміці, не контролюються. Тому досить актуальним є створення високопродуктивних автоматизованих засобів діагностування контактної мережі.

Загальноприйнятими засобами діагностування контактної мережі є мережевимірювальні лабораторії, які дозволяють контролювати її стан по декількох параметрах з реєстрацією на діаграмній стрічці. Однак такі пересувні лабораторії не дають досить точну інформацію про стан струмоприймачів і контактної мережі.

Тому пропонується проводити діагностування системи контактна мережа – струмознімаючий пристрій з використанням тепловізійної техніки, наприклад, тепловізорів. Крім цієї системи є можливість діагностувати й інші системи трамваїв і тролейбусів.

Результати використання даної техніки на практиці наведено в роботах [20-32], де є схвальні відгуки щодо впровадження тепловізорів.

Але зрозуміло, що це порівняно дорогий метод діагностування. Враховуючи те, що основною задачею міського електротранспорту є безпечне перевезення людей, то даний вид діагностування обладнання трамваїв і тролейбусів є виправданим хоча б лише по цій одній причині.

В Кременчуцькому державному технічному університеті розроблено випробувальний комплекс для випробування асинхронних, синхронних двигунів та двигунів постійного струму [33]. Щодо двигунів постійного струму, такий комплекс дозволяє здійснити такі операції:

- визначення параметрів заступної схеми двигуна (опорів якірного кола та кола збудження, моменту інерції ротора, коефіцієнт потоку двигуна);
- вимірювання рівня вібрації та визначення ступеня електричної несиметрії машини;

- оцінка справності підшипникових вузлів і аналіз рівня механічної несиметрії;
- випробування двигуна під навантаженням; струмове навантаження двигуна;
- визначення післяремонтних паспортних даних двигуна.

Розглянувши відомі способи оцінки технічного стану систем та вузлів вагонів, видно, що практично всі вони реалізуються лише при стендових дослідженнях. Але зрозуміло, що для більш ефективного діагностування вагонів необхідно здійснювати контроль його параметрів в автоматичному режимі в реальних умовах функціонування. Такий підхід до вирішення проблеми є найбільш ефективним, про що свідчать і дослідження, проведені в роботі [34].

1.3. Аналіз наукових розробок з питань відновлення функціональних систем засобів міського електротранспорту

Для забезпечення своєчасності відновлення ФС засобів міського електротранспорту, як і будь-якого об'єкта, придатного до ремонтування, необхідно мати відповідний комплект ЗЧ його систем.

Тому аналізуватимемо процес відновлення ФС трамваїв і тролейбусів на рівні забезпеченості запасними комплектами.

1.3.1. Організація поповнення запасу

При поставці технічних засобів заводом-виробником на підприємство, кожен із цих технічних засобів здебільшого комплектують одним комплексом ЗЧ, а при груповій поставці – інколи і груповим комплексом ЗЧ.

Одна з можливих схем поповнення запасу показана на рис. 1.7 а [35].

Поповнення запасу на складі експлуатаційного підприємства здійснюється періодично. В деякий випадковий момент часу t_1 (рис. 1.7 б) складається заявка на наступний плановий період, який починається в момент часу t_2 і закінчується в момент t_5 (1-ий період). Позначимо z_1 початкове число запасу відповідного типу в момент t_1 , z_{31} – число замовлених в момент t_1 виробів. Замовлені вироби надходять один раз за період в кількості z_{31} в деякий момент t_3 . За відрізок часу (t_1, t_3) запас зменшується випадковим чином. Запас витрачається на відновлення після відмов і на проведення технічного обслуговування (профілактичних і капітальних ремонтів). До моменту t_3 запас z_3 може бути не тільки додатним, але й від'ємним, що відповідає дефіциту запасу.

В момент t_3 запас поповняється, а потім знову зменшується за випадковим законом. В момент t_4 складається заявка на новий період

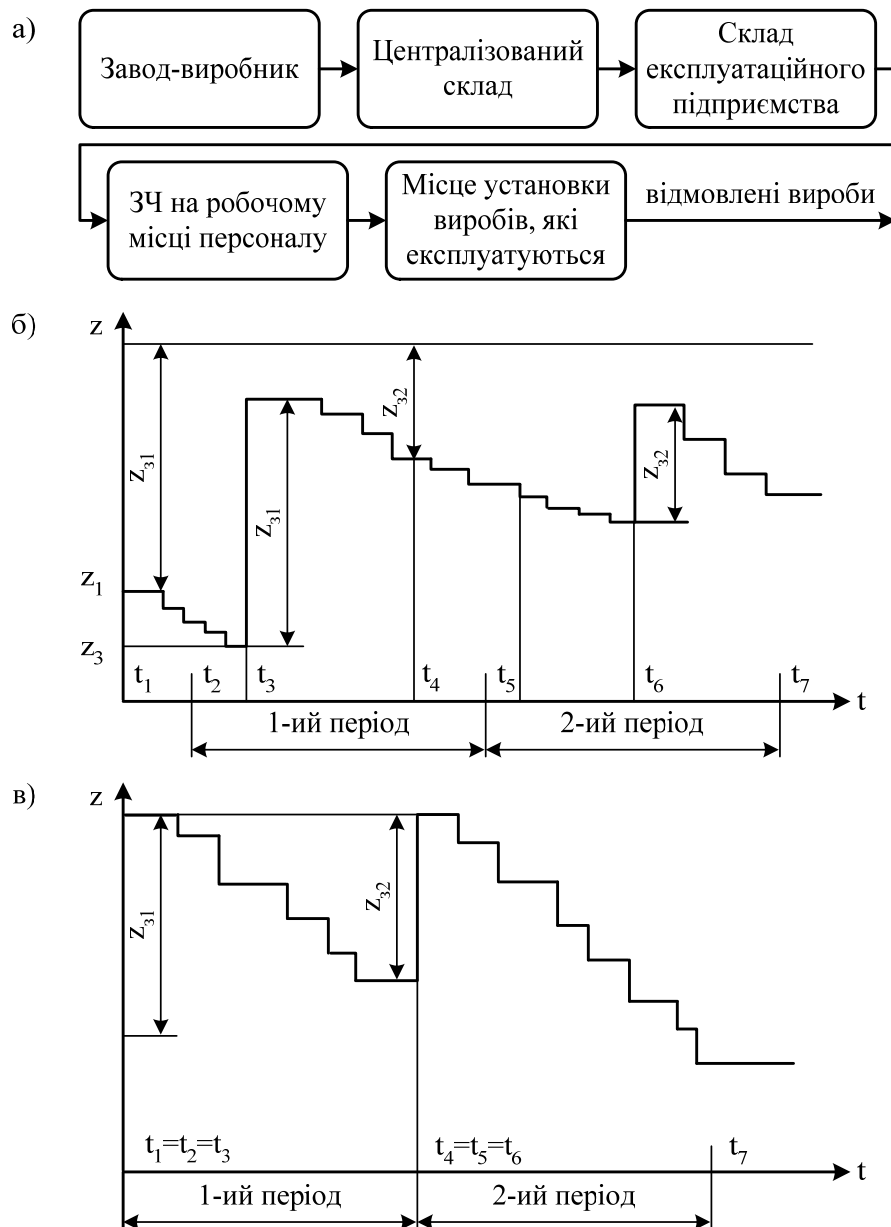


Рис. 1.7. Запас з періодичним поповненням:

а – схема поповнення;

б – графік надходження і витрат запасу при випадковому запізнюванні моментів надходження замовлення;

в – графік надходження і витрат запасу при відсутності запізнювання моменту надходження замовлення [35].

планування, який починається в t_5 і закінчується в t_7 (2-ий період). Запас z_{32} по цій заявці поступає в момент t_6 і т.д.

Величина z_{31} повинна бути достатньою для експлуатації виробів на проміжку часу (t_3, t_6) і визначається як різниця $z_{31} = z - z_1$, де z – необхідний рівень, до якого відбувається поповнення запасу.

Для спрощення розрахунку кількості ЗЧ для вказаного способу поповнення в роботі [35] припускається, що затримка між моментом складання заявки і надходженням замовлення відсутня, тобто $t_1 = t_2 = t_3$, $t_4 = t_5 = t_6$ і т.і. (рис. 1.7 в).

Розглянута стратегія поповнення запасу не єдино можлива: крім запланованого поповнення можливе і непланове з екстреними доставками запасу з централізованого складу галузі або заводу-виробника. Затрати на екстрену доставку більш суттєві, ніж на планову.

Відновлювані вироби у випадку відмови або ремонтуються, або поступають на ремонт в майстерні або в спеціалізовані сервісні підприємства. Після ремонту виріб повертається в запас (рис. 1.8) [35].

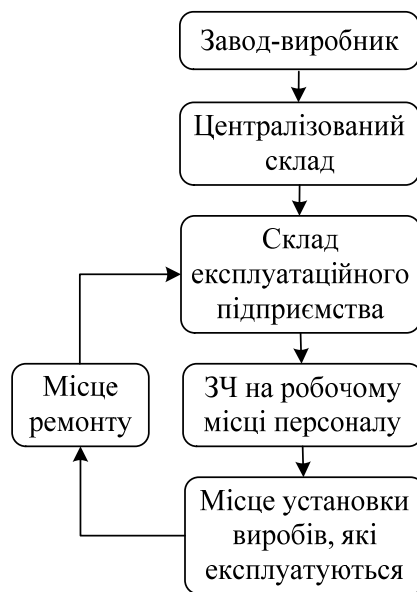


Рис. 1.8. Схема руху відновлюваного запасу

1.3.2. Аналіз математичних моделей для розрахунку запасних частин

В роботі [36] розрахунок кількості ЗЧ для забезпечення заданого рівня безвідмовності в гарантійний період роботи об'єкта (в нашому випадку трамвая або тролейбуса) пропонується здійснювати, виходячи з співвідношення

$$z = n_{\text{од}} \left(\frac{T_{\text{т}}}{T_{\text{с}}} - 1 \right), \quad (1.15)$$

де $n_{\text{од}}$ – число однотипних елементів, одночасно встановлених в технічний пристрій;

$T_{\text{т}}$ – гарантійний ресурс трамвая (тролейбуса);

$T_{\text{с}}$ – гарантійний ресурс деякої ФС.

Знак “мінус” виключає з числа запасних робочу систему, яка встановлюється при початковій зборці трамвая (тролейбуса).

Розрахунок кількості ЗЧ за інтенсивністю відмов в цій же роботі [36] пропонується виконувати за формулою

$$z = n_{\text{од}} \left(\frac{\lambda_c A_T}{A_T \lambda_c} - 1 \right), \quad (1.16)$$

де λ_T – середня інтенсивність відмов трамвая (тролейбуса);

λ_c – середня інтенсивність відмов системи;

A_T, A_c – коефіцієнти, які беруться з табл. 2.2 роботи [36].

Також в роботі [36] наведені співвідношення для розрахунку ЗЧ для деяких розподілів імовірностей.

В роботі [35] пропонується здійснювати розрахунок ЗЧ із такими припущеннями: запасні частини при зберіганні не відмовляють; потік відмов систем найпростіший з параметром Λ ; ремонт повністю відновлює властивості системи; відновлення необмежене (число ремонтного персоналу достатнє для одночасного відновлення всіх систем); тривалість перебування системи на відновленні описується експоненціальним розподілом з параметром ς .

За таких припущень, згідно [35], імовірність безвідмовної роботи трамвая (тролейбуса), який містить v основних і d резервних систем визначається як

$$R(t) = \exp \left(- \frac{v \Lambda t}{\sum_{i=1}^d C_{d+1}^{i+1} \frac{i!}{(v \Lambda / \varsigma)^i}} \right), \quad (1.17)$$

а величина запасу знаходиться як найменше значення d , при якому виконується нерівність

$$\exp \left(- \frac{v \Lambda t}{\sum_{i=1}^d C_{d+1}^{i+1} \frac{i!}{(v \Lambda / \varsigma)^i}} \right) \geq Q_d(t), \quad (1.18)$$

де $Q_d(t)$ – імовірність достатності (імовірність того, що трамвай (тролейбус) не буде простоювати через відсутність запасу).

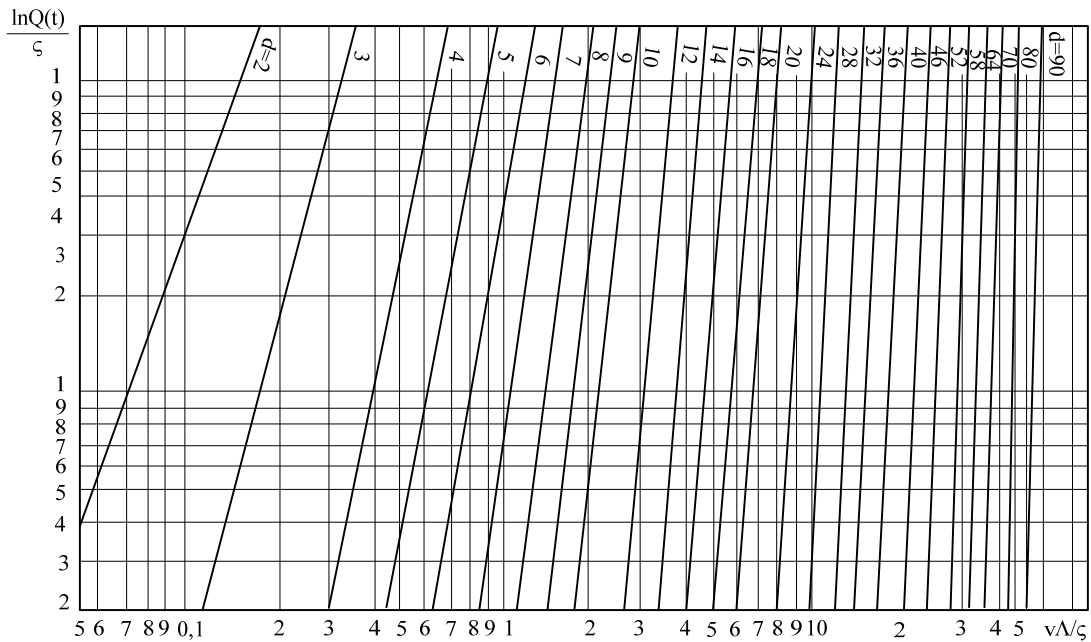


Рис. 1.9. Номограма для визначення ЗЧ

Визначити величину можна, скориставшись номограмою (рис. 1.9), взятою з роботи [35]. Номограма побудована для $t = 7500$ год.

Зауважимо, що такий підхід не враховує імовірності відновлення систем, які відмовили.

В роботах [37-39] моделі для визначення резервів ЗЧ пропонується будувати на основі математичного програмування, в якому витрати на зберігання є цільовою функцією, а керованими змінними – моменти часу, в які необхідно поповнювати відповідну кількість ЗЧ. Такі моделі, як показано в роботі [40], не завжди адекватні реальній ситуації, оскільки вимагають визначених допущень.

В цій же роботі [40] здійснено синтез моделей управління запасами на основі лінгвістичних висловлень. В іншій роботі [41] приведена модель управління запасами, в основу якої поставлена ідея пошуку оптимальної (s, S) -стратегії поповнення ЗЧ. Однак такі моделі враховують лише рівень запасу на складі та попит на нього, а поза увагою залишилися такі параметри, як час перебування відмовленого елемента на ремонті та час його відновлення.

Існує ряд інших методик розрахунку ЗЧ (наприклад, [42-46]), які базуються на використанні імовірнісних моделей. Суттєвим їх недоліком є те, що для спрощення розрахунку вони не враховують імовірність відновлення відмовленої системи чи елемента ремонтним органом. Але такий параметр є досить важливим, що показано в підрозділі 4.2 книги, де і буде здійснений короткий аналіз даних моделей.

1.4. Постановка задач дослідження

Як витікає з аналізу, математичним моделям для оцінки технічного стану та відновлення ФС засобів міського електротранспорту в наукових дослідженнях уваги приділяється недостатньо, а існуючі моделі, отримані різними авторами, дозволяють розв'язувати досить обмежене коло задач.

Виходячи з можливостей математичного моделювання та приведеного аналізу, для розв'язання задач оцінки технічного стану та відновлення ФС трамваїв і тролейбусів доцільно:

1. Побудувати математичні моделі для оцінки технічного стану електротехнічних ФС засобів міського електротранспорту, що забезпечують їх рух, які дозволили б об'єктивно визначити технічний стан системи.

2. Синтезувати математичні моделі для оцінки рівня кваліфікації водіїв засобів міського електротранспорту, для отримання яких необхідно спочатку дослідити закони розподілу споживання електроенергії трамваями на маршрутах, без знання характеру яких неможливо правильно вибрати адекватний клас моделей.

3. Синтезувати математичні моделі для оцінки працездатності ФС засобів міського електротранспорту та розрахунку ЗЧ для їх відновлення, перші з яких враховували б фактор заміни відмовлених елементів, а другі – імовірність відновлення відмовлених елементів.

4. Показати як синтезувати структури систем технічної діагностики основних електромеханічних систем міського електротранспорту з використанням запропонованих моделей, які б дозволили б здійснювати оцінку стану систем в режимі функціонування.

Оскільки умови функціонування трамваїв і тролейбусів суттєво відрізняються, то різнитимуться і математичні моделі для оцінки технічного стану і відновлення їх ФС. В даній книзі ми сконцентруємо увагу на розв'язанні поставлених задач лише відносно трамваїв.

1.5. Висновки

1. Одним із способів підвищення ефективності функціонування засобів міського електротранспорту є використання математичних моделей та систем для оцінки технічного стану обладнання електротранспорту, а також математичних моделей для визначення оптимального резерву ЗЧ для його відновлення.

2. Аналіз досліджень, виконаних іншими науковцями, показав, що існують перспективні підходи до розв'язання поставлених задач, але недостатньо розроблені моделі, за допомогою яких можна реалізувати

ці підходи.

3. В ході аналізу встановлено, що відомі моделі оцінки працездатності засобу не враховують ряд особливостей, головні з яких: вплив на поведінку моделі оцінки працездатності системи фактору заміни відмовленого її елемента новим або післяремонтним; імовірності відновлення ремонтним органом елементів, які вийшли з ладу, для визначення необхідної кількості ЗЧ; здійснення оцінки стану систем в процесі роботи електротранспорту.

4. Для побудови математичних моделей оцінки і прогнозування технічного стану та відновлення ФС засобів міського електротранспорту, які б усунули виявлені недоліки існуючих методів, необхідно розв'язати задачі дослідження, поставлені в підрозділі 1.4.

Оскільки засоби міського електротранспорту мають велику кількість ФС, опис яких потребує індивідуального дослідження кожної з них, то в даній книзі увага буде зосереджена здебільшого лише на тих, які є основними для забезпечення руху трамвая, а саме – електродвигунах, їх прискорювачах та водіях, які керують цими електромеханічними системами.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ МІСЬКИХ ТРАМВАЇВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЇХ РУХ

Основними електротехнічними ФС міських трамваїв, що забезпечують їх рух, є електропривод, прискорювач та РКС. Крім цих трьох електротехнічних ФС в організації руху трамвая бере участь також його водій.

Основною причиною виходу з ладу системи електроприводу є відмова тягового електродвигуна.

Хоча РКС є найбільш ненадійною, але по затратах електроенергії вона поступається іншим вказаним системам, що забезпечують рух трамвая.

Тому в першу чергу розглянемо саме ці три системи: тяговий електродвигун трамвая, його прискорювач та водія як систему керування функціональними системами трамвая.

2.1. Синтез математичної моделі для оцінки технічного стану тягового електричного двигуна

2.1.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

На даний момент часу існує велика кількість методів та засобів оцінки технічного стану електричних двигунів, більшість з яких базуються на визначенні стану ізоляції обмоток. Це пояснюється тим, що електричні двигуни, часто виходять з ладу внаслідок старіння або пошкодження ізоляційних матеріалів. Як відомо [47, 48], якщо температура обмотки електричної машини перевищить на 8°C номінальну розрахункову, то термін служби ізоляції обмотки зменшиться вдвічі.

Звичайно, у двигунів постійного струму одним з найбільш ненадійних їх елементів є колектор. Але за даними Вінницького ТТУ тягові двигуни найчастіше виходять з ладу через пошкодження якоря. В роботі [47] встановлено, що під час експлуатації тягового двигуна підвищений нагрів має саме якір. Тому діагностування тягового двигуна будемо здійснювати лише за станом ізоляції обмотки якоря.

2.1.2. Синтез математичної моделі визначення залишкового ресурсу тягового електродвигуна за станом ізоляції обмотки якоря

Відповідно до правила Монтзингера [49, 50] термін служби ізоляції можна визначити з рівності

$$D_{\vartheta} = L_0 \cdot 2^{\frac{-\vartheta}{\Delta\vartheta_{\text{я}}}}, \quad (2.1)$$

де D_{ϑ} – термін служби ізоляції при незмінній температурі ϑ ($^{\circ}\text{C}$), років;

$\Delta\vartheta_{\text{я}}$ – постійна величина збільшення температури, при якій термін служби ізоляції обмотки якоря зменшується вдвічі, $^{\circ}\text{C}$;

L_0 – термін служби ізоляції при навколишній температурі 20°C , років.

Якщо відомий робочий цикл машини протягом деякого проміжку часу, то можна визначити частину терміну служби машини, яка використана під час циклу. Якщо протягом проміжку часу t_1 навантаження і навколишня температура постійні, то незмінна також і температура ізоляції. Якщо вважати, що ізоляція відноситься до деякого класу, а постійна температура рівна ϑ_i , то цій температурі згідно (2.1) відповідає деякий термін служби D_{ϑ_i} . В такому випадку відносна величина використаної протягом t_1 років частини загального ресурсу часу (у відсотках) виражається формулою

$$V_{t1} = \frac{t_1}{D_{\vartheta_i}} \cdot 100\%. \quad (2.2)$$

Якщо навантаження або відповідно температура протягом часу t_1 змінюється, то термін служби, що відповідає миттєвому значенню змінної температури ϑ , рівний D_{ϑ} і частина загального ресурсу часу, використана протягом елементарного інтервалу часу dt , рівна $100dt/D_{\vartheta}$. Таким чином

$$V_t = 100 \cdot \int_0^{t_1} \frac{dt}{D_{\vartheta}} (\%). \quad (2.3)$$

В якості простого випадку розглянемо лінійну залежність температури від часу. Нехай в момент часу $t = 0$ температура рівна $\vartheta_{\text{н}}$ і при $t = t_1$ температура рівна ϑ_1 , тоді в інтервалі часу $0-t_1$ змінна температура визначається рівнянням

$$\vartheta = \vartheta_{\text{н}} + \frac{\vartheta_1 - \vartheta_{\text{н}}}{t_1} \cdot t. \quad (2.4)$$

Підставивши це рівняння в (2.3), обчисливши значення інтегралу і здійснивши деякі перетворення, отримаємо такий вираз для викорис-

таної за час t_1 частини загального ресурсу [49]:

$$V_{t1} = \frac{\Delta\vartheta_{\text{я}}}{\ln 2} \cdot \frac{t_1}{\vartheta_1 - \vartheta_{\text{н}}} \cdot \left(\frac{1}{D_{\vartheta_1}} - \frac{1}{D_{\text{н}}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

де $\Delta\vartheta_{\text{я}}$ – розмір зміни температури обмотки якоря;

t_1 – тривалість зміни температури;

$\vartheta_{\text{н}}$ – номінальна температура для даного класу ізоляції;

$D_{\text{н}}$ – термін служби ізоляції при номінальній незмінній температурі;

D_{ϑ_1} – термін служби, що залишився, ізоляції.

З виразу (2.5) отримаємо вираз для визначення залишкового терміну служби ізоляції (залишкового ресурсу двигуна по стану ізоляції)

$$D_{\vartheta_1} = \frac{D_{\text{н}} \cdot \Delta\vartheta_{\text{я}} \cdot t_1}{100 \cdot \Delta\vartheta_{\text{я}} \cdot t_1 + \ln 2 \cdot V_{t1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{\text{н}})} \cdot 100\%. \quad (2.6)$$

Визначати температуру обмотки якоря будемо по температурі обмотки додаткових полюсів. Це обумовлено тим, що по обмотках якоря і обмотках додаткових полюсів протікає однаковий струм, при цьому їх охолодження здійснюється однаковим потоком повітря. В роботах [51, 52] доведено, що температури кожної з обмоток тягового двигуна практично не відрізняються, тому їх можна розглядати як окремі тіла.

Згідно [53, 54] перевищення температури в момент часу t_1 при нагріванні тіла визначається співвідношенням

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_0}} \right) + \Delta\vartheta_0 e^{-\frac{t_1}{T_0}}, \quad (2.7)$$

де $\Delta\vartheta_{\infty}$ – встановлене перевищення температури;

T_0 – стала часу;

$\Delta\vartheta_0$ – початкове перевищення температури.

Для обмоток якоря і додаткових полюсів тягового двигуна параметри $\Delta\vartheta_{\infty}$ і T_0 можна визначити з таких співвідношень [53]:

$$\Delta\vartheta_{\text{я}\infty} = \frac{I^2 R_{\text{я}} + k_{\text{ст}} P_{\text{ст}}}{B_{\text{я}} - I^2 R_{\text{я}} k_{\text{м}}}, \quad (2.8)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{д.п.}\infty} = \frac{I^2 R_{\text{д.п.}}}{B_{\text{д.п.}} - I^2 R_{\text{д.п.}} k_M}; \quad (2.9)$$

$$T_{0,\text{я}} = \frac{C_{\text{я}}}{B_{\text{я}} - I^2 R_{\text{я}} k_M}; \quad (2.10)$$

$$T_{0,\text{д.п.}} = \frac{C_{\text{д.п.}}}{B_{\text{д.п.}} - I^2 R_{\text{д.п.}} k_M}, \quad (2.11)$$

де I – струм, що протікає по обмотці якоря і обмотці додаткових полюсів двигуна;

$R_{\text{я}}, R_{\text{д.п.}}$ – опори обмоток якоря і додаткових полюсів відповідно;

k_M – температурний коефіцієнт міді;

$k_{\text{ст}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив втрат сталі на нагрівання обмотки якоря;

$P_{\text{ст}}$ – втрати в сталі якоря двигуна;

$B_{\text{я}}, B_{\text{д.п.}}$ – умовна тепловіддача обмоток якоря і додаткових полюсів двигуна;

$C_{\text{я}}, C_{\text{д.п.}}$ – умовна теплоємність обмоток якоря і додаткових полюсів двигуна.

Якщо проаналізувати вирази (2.8) – (2.11), то можна виявити, що

$$\Delta\vartheta_{\text{я}} = f_1(I; k_{\text{ст}}; P_{\text{ст}}; B_{\text{я}}; C_{\text{я}}; R_{\text{я}}; k_M; t_1), \quad (2.12)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{д.п.}} = f_2(I; B_{\text{д.п.}}; C_{\text{д.п.}}; R_{\text{д.п.}}; k_M; t_1). \quad (2.13)$$

Із роботи [53] відомо, що перевищення температури обмотки якоря і температури додаткових полюсів в деякий момент часу є функцією від струму двигуна, інтенсивності охолодження Q і тривалості роботи:

$$\Delta\vartheta_{\text{я}} = f_1(I, Q, t_1), \quad (2.14)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{д.п.}} = f_2(I, Q, t_1). \quad (2.15)$$

Якщо розв'язати рівняння (2.15) відносно струму I й підставити отриманий вираз $I = f_3(\Delta\vartheta_{\text{д.п.}})$ у рівняння (2.14), то отримаємо перевищення температури якоря тягового двигуна в залежності від перевищення температури обмотки додаткових полюсів для моменту часу t_1 [53]:

$$\Delta\vartheta_{\text{я}} = f_4(\Delta\vartheta_{\text{д.п.}}) \quad (2.16)$$

Для отримання залишкового ресурсу двигуна необхідно підставити отриманий результат у рівняння (2.6).

Рівняння (2.6), (2.7), (2.14-2.16) з врахуванням (2.8-2.11) і є математичною моделлю, що дозволяє оцінити залишковий ресурс тягового двигуна за станом ізоляції обмотки якоря.

2.2. Синтез математичної моделі оцінки технічного стану прискорювача трамвая

2.2.1. Вихідні передумови та постановка задачі дослідження

Однією з ФС трамвая є його прискорювач. В роботі [5] автори показали, що він є однією з слабких ланок в структурі трамвая: співвідношення несправностей прискорювача по відношенню до інших функціональних систем трамваїв Вінницького трамвайного управління від загальної кількості несправностей в 1998 році становить 25,13 %, “поступаючись” лише РКС – 27,33 %. Тому проблема оцінки стану прискорювача є актуальною.

Прискорювач трамвая КТ-4СУ типу ОА22 являє собою регульований пуско-гальмівний опір, розрахований на максимальну силу струму тягових електродвигунів [55].

Коротко розглянемо загальну будову прискорювача (рис. 2.1 а).

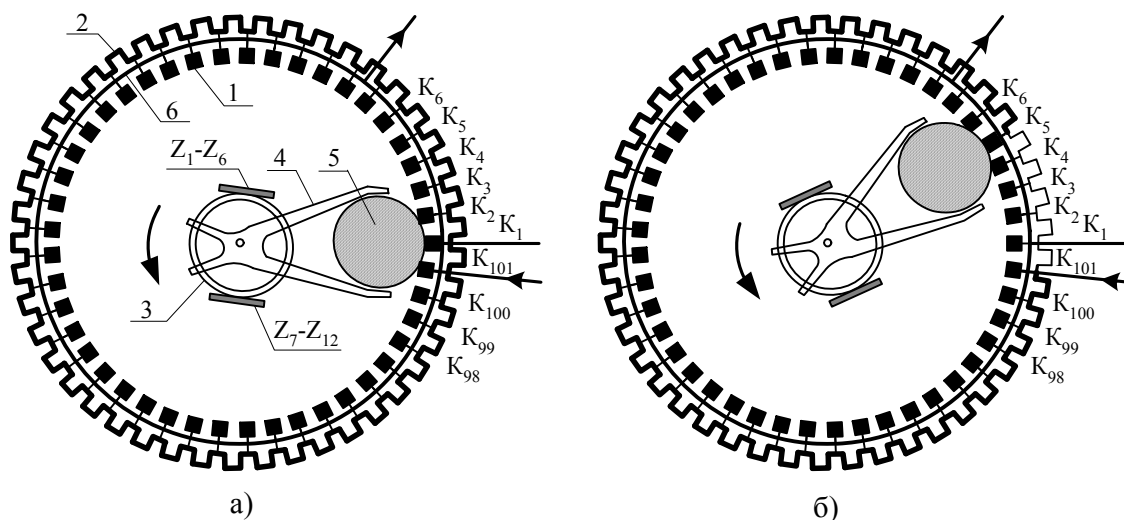


Рис. 2.1. Положення ролика й пальців прискорювача на першій (а) й п'ятій (б) позиціях

Контактні пальці 1 ($K_1 - K_{101}$) з'єднані з секціями опорів 2. На валу розміщений барабан 3 з кулачками у вигляді сегментів й поводок 4 з ізо-

льованим роликом 5, який послідовно притискає контактні пальці 1 до мідного струмознімального кільця 6. Поворот ролика 5 здійснюється за допомогою електродвигуна управління. В залежності від положення ролика 5, який визначає стан (розімкнений чи замкнений) контактних пальців 1, матимемо й відповідні стани блок-контактів $Z_1 - Z_{12}$ (12 пар), які замикаються або розмикаються кулачковим барабаном 3. Блок-контакти призначені для комутації низьковольтних кіл, які використовуються в автоматичній системі пуску і гальмування трамвая. Фіксоване положення барабана 3 з повідком 4 й роликом 5 називається позицією [56].

В основному положенні опори прискорювача повністю ввімкнені в електросхему двигунів. Виведення пуско-гальмівних реостатів з кола тягових електродвигунів прискорювачем забезпечує плавний розгін й гальмування вагону [56].

Як відомо, є три основних режими роботи трамвая: розгін, вибіг і гальмування.

При розгоні водій натисканням на ходову педаль може настроїти пусковий струм на перший – п'ятий ступені в залежності від величини необхідного прискорення. Перший ступінь відповідає мінімальному прискоренню, а п'ятий – максимальному. Виведення реостата залежить від заданого пускового струму. При пуску в хід і наступному розгоні прискорювач виводить опори до нульового значення. Потім прискорювач закорочується, після чого ролик автоматично повертається в початкове положення. Наприклад, на першій позиції прискорювача (рис. 2.1 а) струм увійде через клему контактного пальця K_{101} , пройде всі секції опорів від K_{101} до K_1 , через контактний палець K_1 , який притиснутий до струмознімального кільця, далі по струмознімальному кільцю на вихідний провід. При подальшому русі повідка з роликом притискаються інші контактні пальці, що приводить до зменшення кількості підключених елементів реостата. Так, на п'ятій позиції прискорювача (рис. 2.1 б) струм увійде через клему контактного пальця K_{101} , пройде всі секції опорів від K_{101} до K_5 , через притиснутий до струмознімального кільця контактний палець K_5 , а потім по струмознімальному кільцю на вихідний провід.

Під час вибігу (або під час гальмування) реостати прискорювача виводяться, при цьому ролик рухається з позиції 1 в позицію 101 і в зворотному напрямку. В початковий момент гальмування в коло двигунів введено всі опори прискорювача та гальмівний опір. Коли прискорювач перейде в позицію 101, то опір прискорювача виведений. На цій позиції внаслідок перемикавання контакторів гальмівний опір замінюється опором прискорювача. Оскільки ці опори мають однакове омичне значення, то струм двигунів не зміниться. При подальшій ро-

Діаграма роботи прискорювача наведена на рис. 2.2.

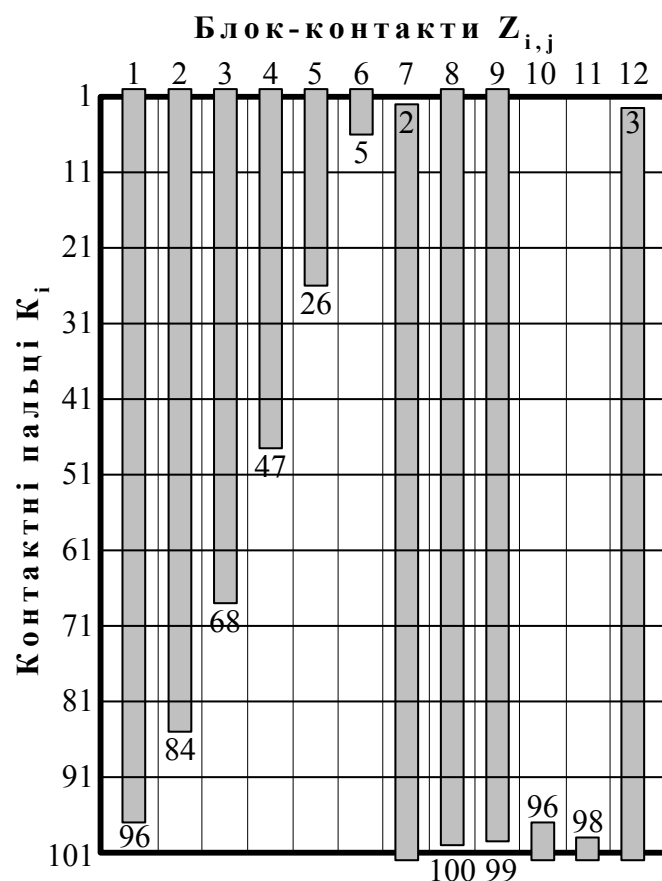


Рис. 2.2. Діаграма роботи прискорювача

Основною проблемою роботи прискорювача є вихід з ладу контак-

тних пальців 1 та блок-контактів $Z_1 - Z_{12}$, внаслідок чого вони можуть перебувати не у відповідності з діаграмою рис. 2.2 [57].

Тому задачею дослідження є створення системи для діагностування прискорювача. Першим кроком при вирішенні поставленої задачі, є розробка моделі функціонування прискорювача трамвая, яка могла б водночас оцінити технічний стан прискорювача на даний момент часу експлуатації.

2.2.2. Розробка математичної моделі функціонування прискорювача

Для зручності представимо діаграму роботи прискорювача (рис. 2.2) у вигляді табл. 2.1, в якій “1” відповідає замкненому стану контактів Z_{ij} ($i = \overline{1, 101}, j = \overline{1, 12}$), а “0” – розімкненому [58].

Таблиця 2.1

Таблична форма діаграми роботи прискорювача

		Контакти Z_{ij}											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Контактні пальці K_i	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
	3÷5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
	6÷26	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1
	27÷47	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
	48÷68	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	69÷84	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	85÷95	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
	96	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
	97	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
	98÷99	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	100	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1
	101	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1

Введемо деякі позначення: K_i – замкнений i -ий контактний палець; $\overline{K_i}$ –розімкнений i -ий контактний палець; Z_{ij} – стан блок-контакту з номером i, j . Під станом Z_{ij} будемо розуміти такий стан блок-контакту, в якому він відповідає табл. 2.1 (наприклад, $Z_{96,1}=1$, $Z_{96,2}=0$ і т.і.), а відповідно позначення $\overline{Z_{i,j}}$ означає, що даний контакт знаходиться в несправному стані.

Визначити контактний палець K_i , який замикається ізольованим

роликом 5, можна, визначивши положення самого ролика по куту α :

$$\alpha_i = (i-1) \cdot \Delta\alpha,$$

$$\Delta\alpha = \frac{360}{102} = 3,529412^0. \quad (2.17)$$

Враховуючи вищевказане, можна побудувати співвідношення для опису системи функціонування прискорювача, представлені в табл. 2.2, за умови, що прискорювач знаходиться в справному стані.

Таблиця 2.2

Математичний опис функціонування прискорювача трамвая

Кут α	Стани контактних пальців K_i й блок-контактів $Z_{i,j}$
α_1	$K_1 \wedge Z_{1,1} \wedge Z_{1,2} \wedge \dots \wedge Z_{1,12} \wedge \overline{K_2} \wedge \dots \wedge \overline{K_{101}}$
α_2	$K_2 \wedge Z_{2,1} \wedge Z_{2,2} \wedge \dots \wedge Z_{2,12} \wedge \overline{K_1} \wedge \overline{K_3} \wedge \dots \wedge \overline{K_{101}}$
α_3	$K_3 \wedge Z_{3,1} \wedge Z_{3,2} \wedge \dots \wedge Z_{3,12} \wedge \overline{K_1} \wedge \overline{K_2} \wedge \overline{K_4} \wedge \dots \wedge \overline{K_{101}}$
...
α_i	$K_i \wedge Z_{i,1} \wedge Z_{i,2} \wedge \dots \wedge Z_{i,12} \wedge \overline{K_1} \wedge \overline{K_2} \wedge \dots \wedge \overline{K_{i-1}} \wedge$ $\wedge \overline{K_{i+1}} \wedge \dots \wedge \overline{K_{101}}$
...
α_{100}	$K_{100} \wedge Z_{100,1} \wedge Z_{100,2} \wedge \dots \wedge Z_{100,12} \wedge \overline{K_1} \wedge \overline{K_2} \wedge \dots \wedge \overline{K_{99}} \wedge \overline{K_{101}}$
α_{101}	$K_{101} \wedge Z_{101,1} \wedge Z_{101,2} \wedge \dots \wedge Z_{101,12} \wedge \overline{K_1} \wedge \overline{K_2} \wedge \dots \wedge \overline{K_{100}}$

Для побудови математичної моделі оцінки стану прискорювача трамвая введемо додаткові позначення: $y_{i,0}$ – вихідний сигнал, який відповідає несправному контактному пальцю K_i ; $y_{i,j}$ – вихідний сигнал, який відповідає несправному блок-контакту $Z_{i,j}$; $y_{i(m)}$ – вихідний сигнал, який відповідає несправному контактному пальцю K_m при замиканні контакту K_i , $m = \overline{1,101}$, $m \neq i$; \bar{y} – вихідний сигнал, який характеризує відповідність контактних пальців K_i та блок-контактів $Z_{i,j}$ робочій діаграмі.

За таких умов математична модель оцінки стану прискорювача буде мати вигляд

$$\left. \begin{array}{l} y_{i,0} = \overline{K_i} \\ y_{i,j} = \overline{Z_{i,j}} \\ y_{i(m)} = K_{i(m)} \end{array} \right\} \quad \text{при } \alpha_i = (i-1) \cdot \Delta\alpha. \quad (2.18)$$

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ РІВНЯ КВАЛІФІКАЦІЇ ВОДІЇВ ТРАМВАЇВ

Економічність функціонування трамваїв залежить від кількості спожитої ними електроенергії на маршрутах [59, 60].

Контролювання електроспоживанням кожним вагоном окремо дозволяє встановити, по-перше, в якому технічному стані знаходиться той чи інший вагон, по-друге, надає можливість крім економії електроенергії своєчасно попередити вихід з ладу трамвая, а по третє, оцінити рівень кваліфікації водія трамвая.

На кожному з трамваїв Вінницького ТТУ в кабіні водіїв встановлено лічильники електроенергії, розроблені працівниками цього ж ТТУ. За період експлуатації трамваїв, оснащених лічильниками електроенергії, зібрані відповідні статистичні дані про споживання електроенергії тим чи іншим трамваем на маршруті, а також статистичні дані про кожного водія, який здійснював управління цим трамваем.

Наявні масиви даних дають можливість для синтезу математичних моделей оцінки рівня кваліфікації водіїв трамваїв використовувати часові ряди та авторегресійні залежності. Але цей математичний апарат можна застосовувати лише в тому випадку, коли основний параметр, який являє собою випадкову величину, – в нашому випадку це витрати електроенергії – апроксимується нормальним законом розподілу.

Тому почнемо процес побудови моделей для оцінки рівня кваліфікації водіїв трамваїв з перевірки гіпотези нормальності статистичних даних.

3.1. Синтез математичних моделей емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями на маршрутах

3.1.1. Постановка задачі

Для аналізу використовуються усереднені статистичні дані споживання електроенергії трамваями помісячно.

Аналіз питомого споживання електроенергії трамваями зручно здійснювати в одиницях кВт·год. Це зумовлено тим, що на трамваях не встановлені лічильники для виміру їхнього пробігу. Однак такий аналіз буде справедливим лише при незмінній експлуатаційній швидкості трамваїв по депо. До 2002 року середня експлуатаційна швидкість складала біля 11 км/год. З 2002 року вона збільшилася до 14,5 км/год за рахунок зменшення числа рухомих одиниць. Але загальний місячний пробіг вагонів залишився майже на тому ж рівні, що

призвело до інтенсифікації роботи трамваїв. Тому в даному випадку є доцільним дослідити споживання електроенергії трамваями як за годину, так і на 1 км пробігу [61].

В роботі [7] встановлено, що для об'єктивності оцінок необхідно брати подвійну восьмимісячну вибірку статистичних даних, яка включає лише по одному періоду весна/осінь. Тому сформуємо вибірку, яка містить в собі середні значення споживання електроенергії трамваями з 1 лютого по 30 вересня 1999 року, з 1 червня 2000 року по 31 січня 2001 року.

Здійснимо статистичний аналіз та побудуємо математичні моделі емпіричних законів розподілу електроспоживання трамваями.

3.1.2. Побудова математичної моделі споживання електроенергії трамваями за годину

Позначимо через $W^{(r)}$ випадкову величину середнього споживання електроенергії трамваями за годину з конкретними значеннями $w^{(r)}$.

Величина $W^{(r)}$ за вище вказані періоди набула таких значень [61, 62]:

$$w^{(r)} = \{45,52; 47,70; 41,48; 39,99; 36,91; 35,46; 34,78; 33,95; 33,74; 33,76; 33,06; 33,43; 34,37; 36,48; 33,42; 38,06\}. \quad (3.1)$$

В послідовності (3.1) знаходимо мінімальне $w_{\min}^{(r)}$ і максимальне $w_{\max}^{(r)}$ значення:

$$w_{\min}^{(r)} = 33,06; \quad w_{\max}^{(r)} = 47,70. \quad (3.2)$$

З діапазону значень $W^{(r)}$ виділимо інтервали з врахуванням того, щоб мінімальне значення $w_{\min}^{(r)}$ попало в перший, а максимальне $w_{\max}^{(r)}$ – в останній інтервали. Отримаємо варіаційний ряд вибірки електроспоживання трамваями за годину, приведений в табл. 3.1.

Частоту $p(w^{(r)})_i$ попадань випадкової величини $W^{(r)}$ в кожний із шести виділених напіввідкритих інтервалів можна обчислити за формулою [63]

Таблиця 3.1

Варіаційний ряд вибірки (3.1) електроспоживання трамваями
за годину

i	δ_i	$n_{(w^{(r)})_i}$	$p_{(w^{(r)})_i}$
1	[33 – 36)	9	0,5625
2	[36 – 39)	4	0,25
3	[39 – 42)	1	0,0625
4	[42 – 45)	0	0
5	[45 – 48)	2	0,125
Сума		16	1

$$p_{(w^{(r)})_i} = \frac{n_{(w^{(r)})_i}}{n}, \quad (3.3)$$

де n – сумарна кількість значень випадкової величини $W^{(r)}$;

$n_{(w^{(r)})_i}$ – кількість значень $W^{(r)}$ які попали в i -ий напіввідкритий інтервал довжиною δ_i .

За даними табл. 3.1 будуюмо гістограму варіаційного ряду (3.1), яка представлена на рис. 3.1.

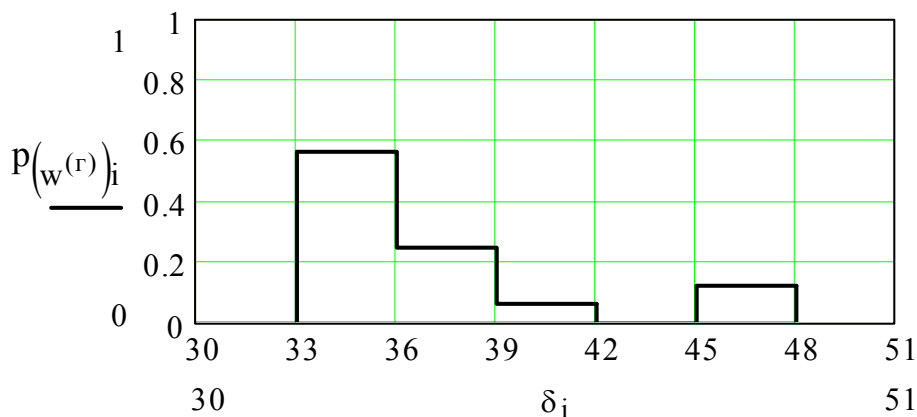


Рис. 3.1. Гістограма варіаційного ряду вибірки електроспоживання трамваями за годину

Використовуючи значення $W^{(r)}$ із (3.1), можна знайти статистичні оцінки середнього значення $m_{W^{(r)}}$, дисперсії $D_{W^{(r)}}$ та середньоквадратичного відхилення $\sigma_{W^{(r)}}$ випадкової величини $W^{(r)}$ за формулами [63-86]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{w^{(\tilde{a})}} = \frac{1}{N^*} \cdot \sum_{j=1}^{N^*} w^{(\tilde{a})}, \\ D_{w^{(\tilde{a})}} = \frac{1}{N^* - 1} \cdot \sum_{j=1}^{N^*} w^{(\tilde{a})^2} - m_{w^{(\tilde{a})}}^2, \\ \sigma_{w^{(\tilde{a})}} = \sqrt{D_{w^{(\tilde{a})}}}. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

В результаті розрахунків отримано:

$$m_{w^{(r)}} = 36,944; \quad D_{w^{(r)}} = 19,88; \quad \sigma_{w^{(r)}} = 4,459. \quad (3.5)$$

Аналізуючи вид гістограми (рис. 3.1), висуваємо гіпотезу про логарифмічний нормальний закон розподілу споживання електроенергії трамваями за годину.

Для логарифмічного перетворення вибірки (3.1), як і в роботі [7], використаємо оператор $10\lg w^{(r)}$

$$\hat{w}^{(r)} = 10\lg w^{(r)}. \quad (3.6)$$

В результаті застосування операції (3.6) до вибірки (3.1), отримаємо

$$\begin{aligned} \hat{w}^{(r)} = \{ & 16,582; 16,785; 16,178; 15,91; 15,671; \\ & 15,497; 15,413; 15,308; 15,281; 15,284; \\ & 15,193; 15,241; 15,362; 15,621; 15,24; 15,805 \}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Статистичні оцінки випадкової величини $\hat{W}^{(r)}$:

$$m_{\hat{w}^{(r)}} = 15,633; \quad D_{\hat{w}^{(r)}} = 0,194; \quad \sigma_{\hat{w}^{(r)}} = 0,441. \quad (3.8)$$

Для перевірки гіпотези про нормальний логарифмічний закон розподілу електроспоживання трамваями за годину використаємо χ^2 -критерій Пірсона [63, 65, 87, 88], для якого необхідним є визначення статистики Q^2

$$Q_{\hat{w}^{(r)}}^2 = \sum_{i=1}^{h(\hat{w}^{(r)})} \frac{\left(n_{\hat{w}^{(r)}}^* - m_{\hat{w}^{(r)}}^* \right)_i^2}{m_{\hat{w}^{(r)}}^*}, \quad (3.9)$$

де $h(\hat{w}^{(r)})$ – кількість інтервалів для випадкової величини $\hat{W}^{(r)}$ з ненульовим значенням частоти попадання в ці інтервали. Для нашого випадку $h(\hat{w}^{(r)}) = 5$.

Розрахунок статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2$ приведено в табл. 3.2, в якій використано функцію нормального розподілу $\Phi\left(\frac{\hat{w}_i^{(r)} - m_{\hat{w}^{(r)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(r)}}}\right)$, взяту з роботи [63], і табл. 3.3.

Таблиця 3.2

Розрахунок частоти $p_{\hat{w}^{(r)}}^*$

$\hat{w}_i^{(r)}$	$\frac{\hat{w}_i^{(r)} - m_{\hat{w}^{(r)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(r)}}}$	$\Phi\left(\frac{\hat{w}_i^{(r)} - m_{\hat{w}^{(r)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(r)}}}\right)$	$p_{\hat{w}^{(r)}}^*$
$-\infty$	$-\infty$	0	
15,3	-0,71	0,23885	0,23885
15,6	-0,10	0,46017	0,22132
15,9	0,51	0,69497	0,23480
16,2	1,12	0,86864	0,17367
∞	∞	1	0,13136
Сума	—	—	1

В табл. 3.3 $m_{\hat{w}^{(r)}}^*$ – теоретична частота попадання значень $\hat{W}^{(r)}$ в кожен i -ий інтервал:

$$m_{\hat{w}^{(r)}}^* = n \cdot p_{\hat{w}^{(r)}}^* \quad (3.10)$$

З табл. 3.3 отримуємо значення статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2 = 0,8015$.

Для моделі нормального логарифмічного закону розподілу маємо кількість незалежних параметрів $r = 2$ ($m_{\hat{w}^{(r)}}$ і $\sigma_{\hat{w}^{(r)}}$). Тоді кіль-

Таблиця 3.3

Розрахунок статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2$

Інтервали	$n_{\hat{w}^{(r)}}^*$	$p_{\hat{w}^{(r)}}^*$	$m_{\hat{w}^{(r)}}$	$\frac{\left(n_{\hat{w}^{(r)}}^* - m_{\hat{w}^{(r)}}\right)^2}{m_{\hat{w}^{(r)}}}$
$-\infty - 15,3$	5	0,23885	3,82	0,3645
$15,3 - 15,6$	4	0,22132	3,54	0,05977
$15,6 - 15,9$	3	0,2348	3,76	0,15362
$15,9 - 16,2$	2	0,17367	2,78	0,21885
$16,2 - \infty$	2	0,13136	2,1	0,00476
Сума	16	1	16	0,8015

кість степенів свободи $g_{\hat{w}^{(r)}}$ статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2$ обчислюється за формулою [63]

$$g_{\hat{w}^{(r)}} = h_{\hat{w}^{(r)}} - r - 1, \quad (3.11)$$

$$g_{\hat{w}^{(r)}} = 5 - 2 - 1 = 2.$$

Задавшись рівнем значимості $\beta = 0,1$ і маючи $g_{\hat{w}^{(r)}} = 2$, по таблиці χ^2 -розподілу Пірсона [63] знаходимо критичну область для статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2$

$$Q_{\hat{w}^{(r)}}^2 > 4,605. \quad (3.12)$$

Оскільки значення розрахункове значення статистики $Q_{\hat{w}^{(r)}}^2$ не попадає в критичну область (3.12)

$$Q_{\hat{w}^{(r)}}^2 < Q_{\hat{w}^{(r)}}^2_{кр},$$

тому приймаємо гіпотезу про нормальний логарифмічний розподіл споживання електроенергії трамваями за годину.

Густина імовірності випадкової величини $\hat{W}^{(r)}$ для моделі нормального закону розподілу мала б вигляд [63, 89-93]:

$$f(\hat{w}^{(r)}) = \frac{1}{\sigma_{\hat{w}^{(r)}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\hat{w}^{(r)} - m_{\hat{w}^{(r)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(r)}}} \right)^2}. \quad (3.13)$$

Модель нормального логарифмічного закону для $\hat{W}^{(r)}$ буде справедлива в формі (3.13), (3.6) з статистичними оцінками (3.8) [63, 64].

Визначимо довірчі інтервали для параметрів (3.8) з довірчою імовірністю $v = 0,98$. З таблиці розподілу Стюдента [63] знайдемо величину $t_v = 2,60$.

По таблиці χ^2 -розподілу знайдемо дві пари чисел u_1 і u_2 , які задовольняли б умові

$$P(u_1 \leq \chi^2 \leq u_2) = v \quad (3.14)$$

з симетричністю по імовірності:

$$\begin{aligned} P(\chi^2 < u_1) &= P(\chi^2 > u_2) = \frac{1}{2}(1 - v), \\ P(\chi^2 > u_1) &= \frac{1}{2}(1 + v). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Використовуючи таблицю χ^2 -розподілу з роботи [63], отримаємо $u_1 = 5,229$; $u_2 = 30,578$.

Точність оцінки розраховуємо за формулою [63]

$$\Delta(\hat{w}^{(r)}) = t_v \frac{\sigma_{\hat{w}^{(r)}}}{\sqrt{n}}, \quad (3.16)$$

$$\Delta(\hat{w}^{(r)}) = 2,60 \cdot \frac{0,491}{\sqrt{16}} = 0,31915.$$

Знаходимо довірчі інтервали для середнього значення $m_{\hat{w}^{(r)}}$, дисперсії $D_{\hat{w}^{(r)}}$ та стандартного відхилення $\sigma_{\hat{w}^{(r)}}$ за відповідними формулами [63, 88]:

$$\begin{aligned}
\left[m_{\hat{w}(r)} - t_v \frac{\sigma_{\hat{w}(r)}}{\sqrt{n}} \right] &\leq m_{\hat{w}(r)} \leq \left[m_{\hat{w}(r)} + t_v \frac{\sigma_{\hat{w}(r)}}{\sqrt{n}} \right], \\
\frac{(n-1)D_{\hat{w}(r)}}{u_2} &\leq D_{\hat{w}(r)} \leq \frac{(n-1)D_{\hat{w}(r)}}{u_1}, \\
\frac{\sigma_{\hat{w}(r)} \sqrt{n-1}}{\sqrt{u_2}} &\leq \sigma_{\hat{w}(r)} \leq \frac{\sigma_{\hat{w}(r)} \sqrt{n-1}}{\sqrt{u_1}}.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

В результаті розрахунків отримаємо такі довірчі інтервали [61, 62]:
 $15,33 \leq m_{\hat{w}(r)} \leq 15,97, \quad 0,12 \leq D_{\hat{w}(r)} \leq 0,7, \quad 0,34 \leq \sigma_{\hat{w}(r)} \leq 0,83.$ (3.18)

3.1.3. Побудова математичної моделі споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу

Позначимо через $W^{(n)}$ випадкову величину середнього споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу із значеннями $w^{(n)}$. Величина $W^{(n)}$ за вище вказані періоди набула таких значень [61, 62]:

$$\begin{aligned}
w^{(n)} = \{ &3,37; 3,53; 3,09; 2,89; 2,73; 2,54; 2,46; 2,41; \\ &2,34; 2,35; 2,29; 2,33; 2,39; 2,62; 2,41; 2,72 \}.
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Мінімальне $w^{(n)}_{\min}$ і максимальне $w^{(n)}_{\max}$ значення послідовності (3.19):

$$w^{(n)}_{\min} = 2,29; \quad w^{(n)}_{\max} = 3,53. \tag{3.20}$$

Варіаційний ряд вибірки електроспоживання трамваями на 1 км пробігу, приведений в табл. 3.4, а гістограма цього ряду – на рис. 3.2.

Статистичні оцінки випадкової величини $W^{(n)}$:

$$m_{w^{(n)}} = 2,654; \quad D_{w^{(n)}} = 0,147; \quad \sigma_{w^{(n)}} = 0,383. \tag{3.21}$$

Аналізуючи вид гістограми (рис. 3.2), висуваємо гіпотезу про логарифмічний нормальний закон розподілу споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу.

В результаті логарифмічного перетворення вибірки (3.19) за формулою (3.6) отримаємо

Таблиця 3.4

Варіаційний ряд вибірки (3.19) електроспоживання трамваями
на 1 км пробігу

i	δ_i	$n_{(w^{(n)})_i}$	$p_{(w^{(n)})_i}$
1	[2,1 – 2,4)	5	0,3125
2	[2,4 – 2,7)	5	0,3125
3	[2,7 – 3,0)	3	0,1875
4	[3,0 – 3,3)	1	0,0625
5	[3,3 – 3,6)	2	0,125
Сума		16	1

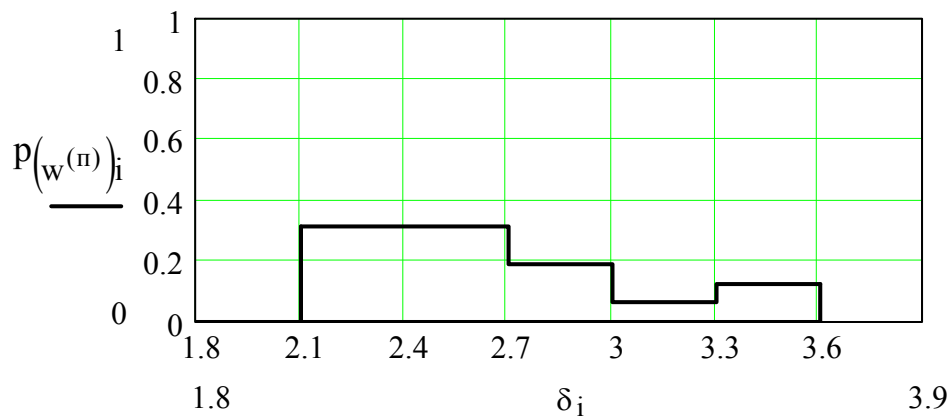


Рис. 3.2. Гістограма варіаційного ряду вибірки електроспоживання трамваями на 1 км пробігу

$$\hat{w}^{(n)} = \{5,276; 5,478; 1,9; 4,609; 4,362; 4,048; 3,909; 3,82; 3,692; 3,711; 3,598; 3,674; 3,784; 4,183; 3,82; 4,346\}. \quad (3.22)$$

Статистичні оцінки випадкової величини $\hat{W}^{(n)}$:

$$m_{\hat{W}^{(n)}} = 4,201; \quad D_{\hat{W}^{(n)}} = 0,347; \quad \sigma_{\hat{W}^{(n)}} = 0,589 \quad (3.23)$$

Розрахунок статистики $Q_{\hat{W}^{(n)}}^2$ приведено в табл. 3.5 і табл. 3.6.

З табл. 3.6 отримуємо значення статистики $Q_{\hat{W}^{(n)}}^2 = 3,00298$.

Кількість степенів свободи $g(\hat{W}^{(n)})$ статистики $Q_{\hat{W}^{(n)}}^2$ $g(\hat{W}^{(n)}) = 2$.

Таблиця 3.5

Розрахунок частоти $p_{\hat{w}^{(n)}}^*$

$\hat{w}_i^{(n)}$	$\frac{\hat{w}_i^{(n)} - m_{\hat{w}^{(n)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(n)}}}$	$\Phi\left(\frac{\hat{w}_i^{(n)} - m_{\hat{w}^{(n)}}}{\sigma_{\hat{w}^{(n)}}}\right)$	$p_{\hat{w}^{(n)}}^*$
$-\infty$	$-\infty$	0	
3,9	-0,51	0,30503	0,30503
4,3	0,17	0,56749	0,26246
4,7	0,85	0,80234	0,23485
5,1	1,53	0,93699	0,13465
∞	∞	1	0,01355
Сума	—	—	1

Таблиця 3.6

Розрахунок статистики $Q_{\hat{w}^{(n)}}^2$

Інтервали	$n_{\hat{w}^{(n)}}^*$	$p_{\hat{w}^{(n)}}^*$	$m_{\hat{w}^{(n)}}$	$\frac{\left(n_{\hat{w}^{(n)}}^* - m_{\hat{w}^{(n)}}\right)^2}{m_{\hat{w}^{(n)}}}$
$-\infty - 3,9$	7	0,30503	4,88	0,92098
3,9 – 4,3	3	0,26246	4,20	0,34286
4,3 – 4,7	3	0,23485	3,76	0,15362
4,7 – 5,1	1	0,13465	2,15	0,61512
5,1 – ∞	2	0,06301	1,01	0,9704
Сума	16	1	16	3,00298

Тому критична область для статистики $Q_{\hat{w}^{(n)}}^2$ у випадку електроспоживання трамваями на 1 км пробігу буде такою ж самою, як і в попередньому випадку. Оскільки розрахункове значення статистики $Q_{\hat{w}^{(n)}}^2$ не попадає в критичну область (3.12), то приймаємо гіпотезу про нормальний логарифмічний розподіл споживання електроенергії трамваями на 1 км пробігу.

Модель нормального логарифмічного закону для $\hat{W}^{(n)}$ буде справедлива в формі (3.13), (3.6) з статистичними оцінками (3.23) [61, 62].

Визначимо довірчі інтервали для параметрів (3.23) з довірчою імо-

вірністю $v = 0,98$. Тоді величина $t_v = 2,60$.

Точність оцінки розраховуємо за формулою (3.16)

$$\Delta_{(\hat{w}^{(n)})} = 2,60 \cdot \frac{0,589}{\sqrt{16}} = 0,383.$$

В результаті розрахунків за формулами (3.17) отримаємо такі довірчі інтервали для статистичних оцінок (3.23) [61, 62]:

$$3,82 \leq m_{\hat{w}^{(n)}} \leq 4,58, \quad 0,17 \leq D_{\hat{w}^{(n)}} \leq 0,94, \quad 0,41 \leq \sigma_{\hat{w}^{(n)}} \leq 0,97. \quad (3.24)$$

3.2. Синтез математичних моделей для оцінки споживання електроенергії трамваями на маршрутах

3.2.1. Постановка задачі

Наші спостереження за водіями трамваїв Вінницького ТТУ показали, що ці витрати в значній мірі залежать від кваліфікації водіїв трамваїв і можуть відрізнятися при роботі на одному і тому ж маршруті дуже суттєво, а в окремих випадках навіть у два рази.

Для того, щоб стимулювати бажання водіїв трамваїв підвищувати свою кваліфікацію і знижувати витрати електроенергії на маршруті, керівництво Вінницького ТТУ запровадило систему преміювання за економію електроенергії. Але ця система не ґрунтується на чіткій шкалі, котра не викликала б незгоди водіїв із рішеннями керівництва.

Тому необхідно створити об'єктивну базу знань про роботу кожного водія трамвая ТТУ в цілому і методологію її оцінки за критерієм витрат електроенергії на функціонування трамваїв під час роботи на маршрутах.

Методологію пропонується побудувати із застосуванням математичних моделей, оснований на використанні часових рядів [65, 94-100].

Для дослідження виберемо двох водіїв, трамваї яких за однаковий проміжок часу в середньому споживають відповідно мінімальну і максимальну кількості електроенергії: назовемо їх відповідно водій “Ч”, трамвай якого споживає електроенергію $W_t^{(Ч)}$, та водій “К”, трамвай якого споживає електроенергію $W_t^{(К)}$. Для порівняння водіїв “Ч” та “К” не лише між собою, але й з “усередненим” по депо водієм “Д”, побудуємо також математичну модель і “усередненого” водія депо “Д”. Витрати електроенергії “усередненим” трамваем будемо розраховувати як частку від ділення витрат електроенергії усіма трамваями,

які в досліджуваний період працювали на маршрутах, на їх кількість. Споживання електроенергії “усередненим” трамваєм депо на маршруті позначимо через $W_t^{(Д)}$.

Як статистичні дані візьмемо значення спожитої електроенергії трамваями обох водіїв протягом одного й того ж періоду, тобто виберемо такі місяці, протягом яких і водій “Ч”, і водій “К” працювали без простоїв та відпусток, а також статистику споживання електроенергії трамваями по депо в цілому за цей же період. Враховуючи такі міркування, можемо вибрати із відповідних відомостей по трамвайному депо річну статистику з 1 липня 2000 року по 30 червня 2001 року [101].

Споживання електроенергії трамваями обох водіїв та “усередненого” водія “Д” депо за вказаний період можна проілюструвати наочно за допомогою рис. 3.3, з якого видно, що у водія “Ч” прослідковується

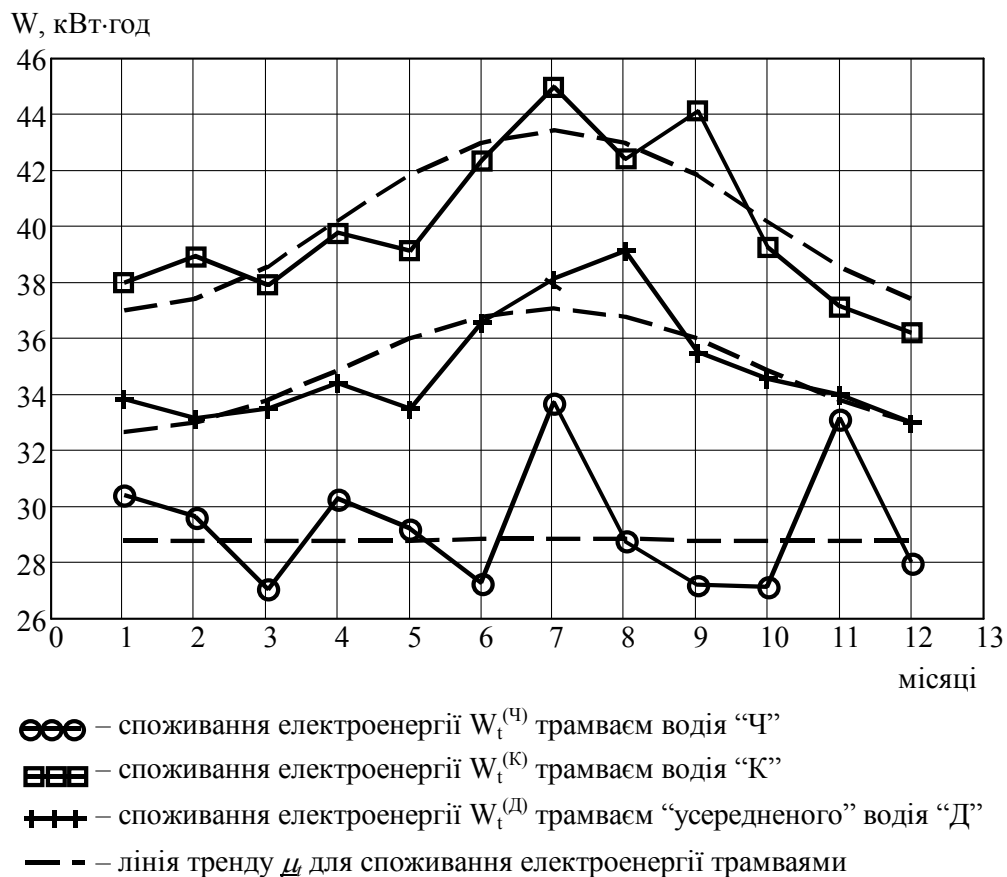


Рис. 3.3. Споживання електроенергії трамваями протягом досліджуваного періоду

стабільність споживання електроенергії його трамваєм, тобто рівень кваліфікації водія є сталим, оскільки відхилення від тренду не зроста-

ють. Щодо водія “К”, то від набутого досвіду відхилення споживання електроенергії його трамваєм від тренду зменшуються, що свідчить про підвищення ним за цей період в певній мірі своєї кваліфікації.

3.2.2. Синтез математичних моделей

Математичні моделі споживання електроенергії трамваєм будемо синтезувати у вигляді суми тренду та авторегресії порядку p , яку для центрованого часового ряду \tilde{W}_t будемо шукати у вигляді

$$\tilde{W}_t = \phi_1 \tilde{W}_{t-1} + \phi_2 \tilde{W}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{W}_{t-p} + a_t, \quad (3.25)$$

де $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ – коефіцієнти авторегресії порядку p ;

a_t – імпульс білого шуму [94-97].

Для розв’язання поставленої задачі насамперед нам необхідно визначити коефіцієнти $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ виразу (3.25). Це можна зробити, використовуючи матричні рівняння Юла-Уокера [94, 97]

$$M_k \cdot \Phi_k = \rho_k, \quad (3.26)$$

$$\text{де } M_k = \begin{bmatrix} \rho_0 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & \rho_0 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-2} \\ \rho_2 & \rho_1 & \rho_0 & \dots & \rho_{p-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \rho_{p-3} & \dots & \rho_0 \end{bmatrix} \text{ – квадратна матриця розмі-}$$

ром $(p \times p)$ значень коефіцієнтів автокореляції для часового ряду

\tilde{W}_t ;

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \dots \\ \phi_p \end{bmatrix} \text{ – матриця-стовпчик розміром } (p \times 1) \text{ коефіцієнтів } \phi_k \text{ для}$$

рівняння авторегресії (3.25);

$$\rho_k = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \dots \\ \rho_p \end{bmatrix} - \text{матриця-стовпчик розміром } (p \times 1) \text{ коефіцієнтів автоко-}$$

реляції часового ряду \tilde{W}_t , які можна визначити за формулою

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0}, \quad (3.27)$$

де γ_k – коефіцієнти автоковаріації, розраховувати які будемо за формулою

$$\gamma_k = \frac{1}{N - k - 1} \sum_{t=1}^{N-k} \tilde{W}_t \tilde{W}_{t+k}, \quad (3.28)$$

де N – кількість статистичних даних;

\tilde{W}_t – центрований часовий ряд, який можна отримати за допомогою виразу:

$$\tilde{W}_t = W_t - \mu_t, \quad (3.29)$$

де μ_t – тренд часового ряду W_t , який для нашої задачі можна знайти із виразу:

$$\mu_t = A_0 + A \sin(\omega(t - 1) + \psi), \quad (3.30)$$

де A_0 , A – середнє значення й амплітуда синусоїди відповідно;

ψ – фаза;

ω – частота:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (3.31)$$

де T – період ($T = 12$ місяців).

В зв'язку з тим, що початок відліку ми взяли з липня, а саме на цей місяць припадає період найвищих річних температур, коли споживан-

ня електроенергії трамваями мінімальне, тому тренд у липні повинен мати найменше значення. А це означає, що фазу ψ синусоїди необхідно зсунути на кут [101]

$$\psi = -\frac{\pi}{2}. \quad (3.32)$$

У виразі (3.30) параметр t зсунуто на одну одиницю назад через те, що відлік місяцям ми беремо не з величини 0, а з 1.

Маючи числові значення частоти ω та фази ψ , коефіцієнти синусоїди A_0 й A легко знайти за стандартною процедурою методу найменших квадратів, закладеною в кожній версії Mathcad.

Зрозуміло, що у виразі (3.27) величина

$$\gamma_0 = \sigma_W^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (W_t - \mu_t)^2 \quad (3.33)$$

є дисперсією часового ряду W_t .

Розв'язок рівнянь (3.26) Юла-Уокера можна знайти у вигляді [94, 97]

$$\Phi_p = M_p^{-1} \rho_p. \quad (3.34)$$

Для визначення гаусового білого шуму a_t з нульовим середнім значенням та дисперсією σ_a^2 скористаємося формулою

$$\sigma_a^2 = \sigma_W^2 - \phi_1 \gamma_1 - \phi_2 \gamma_2 - \dots - \phi_p \gamma_p. \quad (3.35)$$

Використовуючи вище викладений алгоритм, синтезуємо тренди та авторегресійні моделі для споживання електроенергії трамваями “усередненого” водія “Д” та водіїв “Ч” і “К”.

Споживання електроенергії “усередненим” трамваєм депо відобразимо часовим рядом [62, 101]

$$W_t^{(Д)} = \{33,76; 33,06; 33,43; 34,37; 33,42; 36,48; 38,06; 39,06; 35,4; 34,51; 33,91; 32,93\}. \quad (3.36)$$

Тренд $\mu_t^{(Д)}$, розрахований за формулою (3.30) із застосуванням стандартної процедури методу найменших квадратів в Mathcad 2001,

та дисперсія $\sigma_W^{(Д)2}$ ряду (3.36), розрахована за формулою (3.33), приймуть такі значення:

$$\mu_t^{(Д)} = 34,818 + 2,215 \cdot \sin(0,524 \cdot (t-1) - 1,571), \quad (3.37)$$

$$\sigma_W^{(Д)2} = 1,35. \quad (3.38)$$

Центрований ряд $\tilde{W}_t^{(Д)}$ спожитої електроенергії “усередненим” трамваем, розрахований за формулою (3.29) для ряду (3.36), набуде таких значень:

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(Д)} = \{ & 1,16; 0,16; -0,28; -0,45; -2,51; -0,26; \\ & 1,03; 2,32; -0,53; -0,31; 0,2; 0,03 \}. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Підставивши значення $\tilde{W}_t^{(Д)}$ у вираз (3.28), отримаємо для $k = \overline{0, 8}$ коефіцієнти автоковаріації:

$$\begin{cases} \gamma_0^{(Д)} = 1,35; & \gamma_1^{(Д)} = 0,276; & \gamma_2^{(Д)} = -0,412; \\ \gamma_3^{(Д)} = -0,763; & \gamma_4^{(Д)} = -0,325; & \gamma_5^{(Д)} = 0,029; \\ \gamma_6^{(Д)} = 0,223; & \gamma_7^{(Д)} = 0,505; & \gamma_8^{(Д)} = -0,182. \end{cases} \quad (3.40)$$

Підрахуємо автокореляції за формулою (3.27):

$$\begin{cases} \rho_0^{(Д)} = 1; & \rho_1^{(Д)} = 0,205; & \rho_2^{(Д)} = -0,305; \\ \rho_3^{(Д)} = -0,565; & \rho_4^{(Д)} = -0,241; & \rho_5^{(Д)} = 0,021; \\ \rho_6^{(Д)} = 0,165; & \rho_7^{(Д)} = 0,374; & \rho_8^{(Д)} = -0,135. \end{cases} \quad (3.41)$$

Ідентифікуємо $\tilde{W}_t^{(Д)}$ спочатку авторегресійною моделлю 1-го порядку ($k = 1$). В цьому випадку матричне рівняння Юла-Уокера вироджується до вигляду

$$\rho_0^{(Д)} \phi_1^{(Д)} = \rho_1^{(Д)}. \quad (3.42)$$

З виразу (3.41) видно, що

$$\phi_1^{(D)} = \rho_1^{(D)} = 0,205. \quad (3.43)$$

Для авторегресії 1-го порядку дисперсія білого шуму згідно з (3.35) повинна мати значення

$$\begin{aligned} \sigma_a^{(D)2} &= \sigma_W^{(D)2} - \phi_1^{(D)} \gamma_1^{(D)}, \\ \sigma_a^{(D)2} &= 1,35 - 0,205 \cdot 0,276 = 1,29. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Тоді регресійна модель 1-го порядку споживання електроенергії “усередненим” трамваєм депо матиме вигляд

$$\tilde{W}_t^{(D, 1)} = 0,205 \tilde{W}_{t-1}^{(D)} + a_t^{(D, 1)}, \quad (3.45)$$

де білий шум $a_t^{(D, 1)}$ з нульовим середнім визначається дисперсією (3.44).

Далі синтезуємо авторегресійні моделі вищих порядків. Для зручності результати зведемо до табл. 3.7.

Із табл. 3.7 витікає, що споживання електроенергії “усередненим” трамваєм депо адекватно описується авторегресійною моделлю 6-го порядку у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(D)} &= -0,307 \tilde{W}_{t-1}^{(D)} - 0,586 \tilde{W}_{t-2}^{(D)} - 0,866 \tilde{W}_{t-3}^{(D)} - 0,482 \tilde{W}_{t-4}^{(D)} - \\ &\quad - 0,444 \tilde{W}_{t-5}^{(D)} - 0,514 \tilde{W}_{t-6}^{(D)} + a_t^{(D)} \end{aligned} \quad (3.46)$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(D)2} = 0,5$ і трендом

$$\mu_t^{(D)} = 34,818 + 2,215 \cdot \sin(0,524 \cdot (t - 1) - 1,571), \quad (3.47)$$

оскільки модель 7-го порядку, додаючи складності, не підвищує ступеня адекватності [101].

Синтезуємо далі авторегресійні моделі споживання електроенергії трамваями водія “Ч” та водія “К”, які уособлюють водіїв з найкращою і найгіршою кваліфікацією відповідно.

Споживання електроенергії трамваєм водія “Ч” описується часовим рядом [62, 101]

Таблиця 3.7

Авторегресійні моделі споживання електроенергії “усередненим”
трамваєм депо

p	Авторегресійна модель, $\tilde{W}_t^{(Д, p)}$	$\sigma_a^{(Д, p)2}$
1	$0,205\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} + a_t^{(Д, 1)}$	1,29
2	$0,279\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,362\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} + a_t^{(Д, 2)}$	1,12
3	$0,102\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,226\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0,487\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} + a_t^{(Д, 3)}$	0,86
4	$-0,014\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,28\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0,463\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - 0,239\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} + a_t^{(Д, 4)}$	0,81
5	$-0,107\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,46\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0,572\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - 0,245\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} - 0,388\tilde{W}_{t-5}^{(Д)} + a_t^{(Д, 5)}$	0,69
6	$-0,307\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,586\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0,866\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - 0,482\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} - 0,444\tilde{W}_{t-5}^{(Д)} - 0,514\tilde{W}_{t-6}^{(Д)} + a_t^{(Д, 6)}$	0,5
7	$-0,407\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,672\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 0,96\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - 0,65\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} - 0,558\tilde{W}_{t-5}^{(Д)} - 0,574\tilde{W}_{t-6}^{(Д)} - 0,195\tilde{W}_{t-7}^{(Д)} + a_t^{(Д, 7)}$	0,49
8	$-0,655\tilde{W}_{t-1}^{(Д)} - 0,402\tilde{W}_{t-2}^{(Д)} - 1,669\tilde{W}_{t-3}^{(Д)} - 1,477\tilde{W}_{t-4}^{(Д)} - 1,778\tilde{W}_{t-5}^{(Д)} - 1,429\tilde{W}_{t-6}^{(Д)} - 0,713\tilde{W}_{t-7}^{(Д)} - 1,271\tilde{W}_{t-8}^{(Д)} + a_t^{(Д, 8)}$	-0,299

$$W_t^{(Ч)} = \{30,34; 29,58; 26,98; 30,2; 29,13; 27,21; 33,63; 28,7; 27,14; 27,05; 33,07; 27,92\}. \quad (3.48)$$

Виконавши поетапно всі операції, здійснені для побудови авторегресійної моделі споживання електроенергії “усередненим” трамваєм депо, та звівши результати до табл. 3.8 і 3.9, отримаємо, що споживання електроенергії трамваєм водія “Ч” достатньо адекватно описується трендом

$$\mu_t^{(Ч)} = 28,733 + 0,021 \cdot \sin(0,524 \cdot (t - 1) - 1,571) \quad (3.49)$$

Таблиця 3.8

Статистичні, автоковаріаційні та автокореляційні характеристики ряду (3.48)

Тренд, $\mu^{(Ч)}$	$\mu_t^{(Ч)} = 28,733 + 0,021 \cdot \sin(0,524 \cdot (t - 1) - 1,571)$
Дисперсія, $\sigma_W^{(Ч)2}$	5,44
Центрований ряд $\tilde{W}_t^{(Ч)}$	{1,63; 0,87; -1,74; 1,47; 0,39; -1,54; 4,88; -0,05; -1,6; -1,68; 4,35; -0,8}
Коефіцієнти автоковаріації, $\gamma_k^{(Ч)}$	$\gamma_0^{(Ч)} = 5,439$; $\gamma_1^{(Ч)} = -1,676$; $\gamma_2^{(Ч)} = -1,59$; $\gamma_3^{(Ч)} = 0,873$; $\gamma_4^{(Ч)} = 1,742$; $\gamma_5^{(Ч)} = -1,683$
Автокореляція, $\rho_k^{(Ч)}$	$\rho_0^{(Ч)} = 1$; $\rho_1^{(Ч)} = -0,308$; $\rho_2^{(Ч)} = -0,292$; $\rho_3^{(Ч)} = 0,161$; $\rho_4^{(Ч)} = 0,32$; $\rho_5^{(Ч)} = -0,309$

Таблиця 3.9

Авторегресійні моделі споживання електроенергії трамваєм водія “Ч”

p	Авторегресійна модель, $\tilde{W}_t^{(Ч, p)}$	$\sigma_a^{(Ч, p)2}$
1	$-0,308\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} + a_t^{(Ч, 1)}$	4,92
2	$-0,44\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0,428\tilde{W}_{t-2}^{(Ч)} + a_t^{(Ч, 2)}$	4,02
3	$-0,498\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0,488\tilde{W}_{t-2}^{(Ч)} - 0,135\tilde{W}_{t-3}^{(Ч)} + a_t^{(Ч, 3)}$	3,95
4	$-0,458\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0,343\tilde{W}_{t-2}^{(Ч)} + 0,013\tilde{W}_{t-3}^{(Ч)} + 0,298\tilde{W}_{t-4}^{(Ч)} + a_t^{(Ч, 4)}$	3,6
5	$-0,452\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0,342\tilde{W}_{t-2}^{(Ч)} + 0,006\tilde{W}_{t-3}^{(Ч)} + 0,289\tilde{W}_{t-4}^{(Ч)} - 0,019\tilde{W}_{t-5}^{(Ч)} + a_t^{(Ч, 5)}$	3,6

і авторегресійною моделлю 4-го порядку у вигляді

$$\tilde{W}_t^{(Ч)} = -0,458\tilde{W}_{t-1}^{(Ч)} - 0,343\tilde{W}_{t-2}^{(Ч)} + 0,013\tilde{W}_{t-3}^{(Ч)} + 0,298\tilde{W}_{t-4}^{(Ч)} + a_t^{(Ч)} \quad (3.50)$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(Ч)2} = 3,6$ [62, 101].

Споживання електроенергії трамваєм водія “К” описується часо-

вим рядом [62, 101]

$$W_t^{(K)} = \{37,92; 38,87; 37,85; 39,72; 39,04; 42,27; 44,94; 42,38; 44,1; 39,25; 37,1; 36,13\}. \quad (3.51)$$

Як і в попередньому випадку, можна отримати розрахункові дані, представлені в табл. 3.10, та регресійні моделі споживання електроенергії трамваєм водія “К” – в табл. 3.11.

Таблиця 3.10

Статистичні, автоковаріаційні та автокореляційні характеристики ряду (3.51)

Тренд, $\mu^{(K)}$	$\mu_t^{(K)} = 40,139 + 3,24 \cdot \sin(0,524 \cdot (t - 1) - 1,571)$
Дисперсія, $\sigma_W^{(K)2}$	2,21
Центрований ряд $\tilde{W}_t^{(K)}$	$\{1,02; 1,54; -0,67; -0,42; -2,72; -0,67; 1,56; -0,56; 2,34; -0,89; -1,42; -1,2\}$
Коефіцієнти автоковаріації, $\gamma_k^{(K)}$	$\gamma_0^{(K)} = 2,215; \gamma_1^{(K)} = 0,129; \gamma_2^{(K)} = -0,119; \gamma_3^{(K)} = -0,918; \gamma_4^{(K)} = -1,49; \gamma_5^{(K)} = 0,372$
Автокореляція, $\rho_k^{(K)}$	$\rho_0^{(K)} = 1; \rho_1^{(K)} = 0,058; \rho_2^{(K)} = -0,054; \rho_3^{(K)} = -0,414; \rho_4^{(K)} = -0,673; \rho_5^{(K)} = 0,168$

Таблиця 3.11

Авторегресійні моделі споживання електроенергії трамваєм водія “К”

p	Авторегресійна модель, $\tilde{W}_t^{(K, p)}$	$\sigma_a^{(K, p)2}$
1	$0,058\tilde{W}_{t-1}^{(K)} + a_t^{(K, 1)}$	2,21
2	$0,062\tilde{W}_{t-1}^{(K)} - 0,057\tilde{W}_{t-2}^{(K)} + a_t^{(K, 2)}$	2,2
3	$0,038\tilde{W}_{t-1}^{(K)} - 0,032\tilde{W}_{t-2}^{(K)} - 0,41\tilde{W}_{t-3}^{(K)} + a_t^{(K, 3)}$	1,83
4	$-0,277\tilde{W}_{t-1}^{(K)} - 0,056\tilde{W}_{t-2}^{(K)} - 0,381\tilde{W}_{t-3}^{(K)} - 0,769\tilde{W}_{t-4}^{(K)} + a_t^{(K, 4)}$	0,75
5	$-0,317\tilde{W}_{t-1}^{(K)} - 0,076\tilde{W}_{t-2}^{(K)} - 0,384\tilde{W}_{t-3}^{(K)} - 0,783\tilde{W}_{t-4}^{(K)} - 0,052\tilde{W}_{t-5}^{(K)} + a_t^{(K, 5)}$	0,75

В результаті обчислень можемо сказати, що споживання електроенергії трамваєм водія “Ч” достатньо адекватно описується трендом

$$\mu_t^{(K)} = 40,139 + 3,24 \cdot \sin(0,524 \cdot (t - 1) - 1,571) \quad (3.52)$$

і авторегресійною моделлю 4-го порядку:

$$\begin{aligned} \tilde{W}_t^{(K)} = & -0,277\tilde{W}_{t-1}^{(K)} - 0,056\tilde{W}_{t-2}^{(K)} - 0,381\tilde{W}_{t-3}^{(K)} - \\ & - 0,769\tilde{W}_{t-4}^{(K)} + a_t^{(K)} \end{aligned} \quad (3.53)$$

з дисперсією білого шуму $\sigma_a^{(K)2} = 0,75$ [62, 101].

3.3. Висновки

1. Доведено, що споживання електроенергії трамваями апроксимується нормальним логарифмічним законом розподілу, що дає право для побудови моделі оцінки рівня кваліфікації водіїв трамваїв використовувати часові ряди і авторегресійні залежності.

2. Побудовані математичні моделі прогнозу споживання електроенергії трамваями як для “усередненого” трамвая депо, так і для двох трамваїв, якими управляють водії з найкращою і найгіршою кваліфікацією.

3. Синтезовані моделі дозволяють врахувати стохастичність споживання електроенергії трамваями та сезонність роботи і оцінювати рівень кваліфікації водіїв трамваїв.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СИСТЕМ МІСЬКИХ ТРАМВАЇВ ТА РОЗРАХУНКУ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ДЛЯ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

4.1. Синтез математичних моделей для оцінки працездатності функціональних систем трамваїв

Синтез моделей $R(t)$, $\lambda(t)$ оцінок працездатності ФС трамваїв, адаптованих до змін елементів, які вийшли з ладу в цих системах, та змін умов їх функціонування [102] і є метою досліджень, результати яких представлені в даному підрозділі.

4.1.1. Виведення розрахункових співвідношень та побудова алгоритму синтезу моделей

Як відомо [94], найзручнішою формою представлення моделі процесу, інваріантною до початкових умов, в умовах справедливості нормальності закону розподілу, є авторегресія, кожне наступне значення модельованої величини в якій залежить від одного, двох чи декількох попередніх значень.

Фактично авторегресія використовує ідею встановлення ковзного нуля, котрий зміщується в часі в темпі процесу слідом за зміщенням величини, що моделюється, а також ідею інтегрованого віддзеркалення в процесі всіх внутрішніх змін в об'єкті, які породжує даний процес, та змін у взаємодії об'єкта з його зовнішнім оточенням.

Але знову ж таки, як відомо [94], авторегресійні моделі дають задовольняючі результати лише в разі, якщо процеси, які моделюються з їх використанням, є стаціонарними.

Відносно процесів виходу з ладу ФС трамваїв можна зауважити, що вони носять дискретний характер і фактично відносяться до класу часових рядів.

На рис. 4.1, 4.2 наведені графіки дискретних процесів, що характеризують рівень відмов $n_f^{(Г, Т)}$ ГС та $n_f^{(Н, Т)}$ НС трамваїв у Вінницькому ТТУ в 1998 році.

Навіть неозброєним оком із графіків 4.1, 4.2 видно, що процеси $n_f^{(Г, Т)}(t)$ та $n_f^{(Н, Т)}(t)$, де значення часу $t=1, 2, 3, \dots, 12$ фіксовані помісячно, є дискретними стаціонарними процесами зі сталими середніми значеннями (математичними очікуваннями) та сталими дисперсіями.

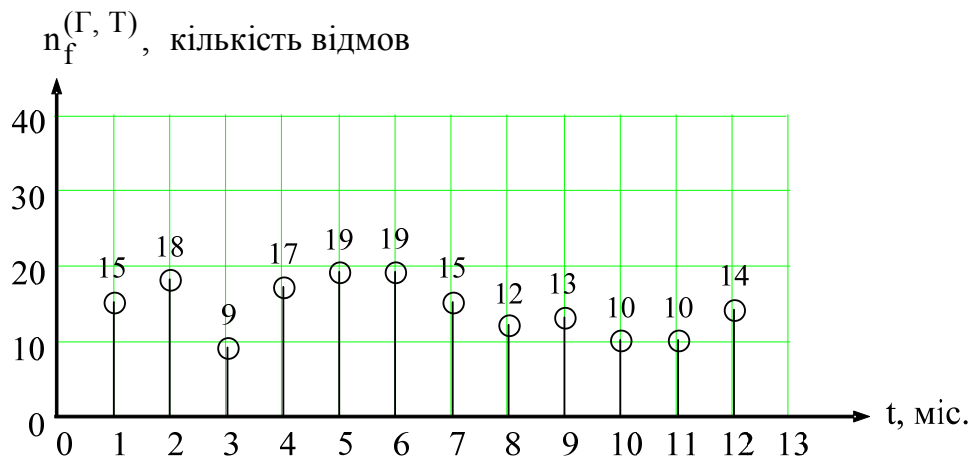


Рис. 4.1. Графік часового ряду, який характеризує процес відмов ГС трамваїв протягом року з помісячною фіксацією

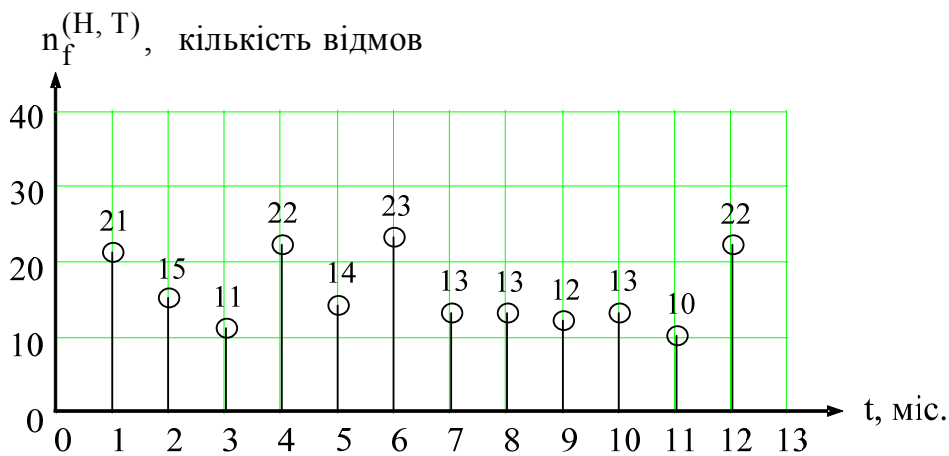


Рис. 4.2. Графік часового ряду, який характеризує процес відмов НС трамваїв протягом року з помісячною фіксацією

Аналогічний характер мають процеси відмов й інших ФС трамваїв, нормальність законів розподілу яких доведено в роботах [6, 7].

Тож використання авторегресійних залежностей для побудови математичних моделей цих систем є цілком виправданим.

Оскільки нас цікавлять не абсолютні, а більш інформативні відносні характеристики процесів відмов, то авторегресійні моделі ми будуватимемо не для величин $n_f(t)$ кожної із ФС, а для імовірностей їх безвідмовної роботи $R(t)$, пов'язаних з $n_f(t)$ виразом (1.6) [103].

Позначимо $\mu_R^{(\bullet)}$ середнє значення характеристики $R(t)$ ФС (\bullet) трамваїв, статистичну оцінку якої будемо знаходити за відомою з математики формулою

$$\bar{\mu}_R^{(\bullet)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j^{(\bullet)}. \quad (4.1)$$

Оскільки моделювання ми здійснюватимемо за річною реалізацією, то в формулі (4.1) матимемо $N = 12$.

Позначимо $\gamma_{R(k)}^{(\bullet)}$ автоковаріацію характеристики $R(t)$ ФС (\bullet) трамваїв, статистичну оцінку якої будемо знаходити за відомою з математики формулою

$$\bar{\gamma}_{R(k)}^{(\bullet)} = \frac{1}{N-k-1} \sum_{j=1}^{N-k} \left(R_j^{(\bullet)} - \bar{\mu}_R^{(\bullet)} \right) \left(R_{j+k}^{(\bullet)} - \bar{\mu}_R^{(\bullet)} \right), \quad k = 0, 1, \dots, p. \quad (4.2)$$

Для центрованого часового ряду $\hat{R}_k^{(\bullet)}$, де

$$\hat{R}_k^{(\bullet)} = R_k^{(\bullet)} - \bar{\mu}_R^{(\bullet)}, \quad (4.3)$$

а оцінка $R_k^{(\bullet)}$ знаходиться для кожного місяця за формулою (1.6), авторегресійну модель порядку p будемо будувати у вигляді

$$\hat{R}_k^{(\bullet)} = \phi_1 \hat{R}_{k-1}^{(\bullet)} + \phi_2 \hat{R}_{k-2}^{(\bullet)} + \dots + \phi_p \hat{R}_{k-p}^{(\bullet)} + a_k, \quad (4.4)$$

де ϕ_1, \dots, ϕ_p – коефіцієнти, числове значення яких можна знайти за відомими рівняннями Юла-Уокера [94];

a_k – імпульс білого шуму з дисперсією D_a , числове значення якої для кожної задачі можна визначити за методикою, викладеною теж в роботі [94], інтерпретація якої є також в роботі [97].

Маючи значення $\hat{R}_k^{(\bullet)}$, $k = 0, 1, \dots$, легко знайти і дискретні значення іншої характеристики процесу – $\lambda_k^{(\bullet)}$.

Для цього знайдемо дискретний аналог формули (1.7).

Для наших вихідних умов –

$$\begin{cases} dt \approx \Delta t = 1, \\ dR(t) \approx \Delta R(t) = R_k - R_{k-1}, \\ k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4.5)$$

З врахуванням співвідношень (4.5) дискретний аналог рівняння (1.7) для ФС (•) трамваїв можна переписати у вигляді

$$\lambda_k^{(\bullet)} = -\frac{1}{\hat{R}_k^{(\bullet)}} \cdot \left(\hat{R}_k^{(\bullet)} - \hat{R}_{k-1}^{(\bullet)} \right), \quad (4.6)$$

$$k = 1, 2, \dots,$$

або

$$\lambda_k^{(\bullet)} = -1 + \frac{\hat{R}_{k-1}^{(\bullet)}}{\hat{R}_k^{(\bullet)}}, \quad (4.7)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

Але цілком очевидно, що в разі, якщо замість тих елементів, що вийшли з ладу, поставити нові, то це приведе до збільшення значення імовірності безвідмовної роботи $\hat{R}_k^{(*)}$ по відношенню до $\hat{R}_{k-1}^{(*)}$. А це означає, що ми, використовуючи формулу (4.6), отримаємо значення $\lambda_k^{(*)}$, яке буде мати знак “–”, що фізично неможливо, оскільки інтенсивність відмов завжди є величиною додатною.

Тож виходить, у випадку відновлення роботи системи за допомогою заміни новими елементів тих, що вийшли з ладу, як формула (1.7), так і її дискретний аналог (4.6) без переносу нуля відліку часу стають недієздатними.

Але є інший вихід. Можна знайти $\lambda_k^{(*)}$ із дискретного аналога формули (1.12), який вочевидь буде мати вигляд для і-тої системи:

$$R_k^{(*)} = e^{-\lambda_k^{(*)}}, \quad (4.8)$$

$$k = 1, 2, \dots$$

В формулі (4.8) ми індекс і опустили аби не переобтяжувати її по-

двійними індексами.

Із (4.8) легко знайти, що

$$\lambda_k^{(*)} = -\ln R_k^{(*)}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.9)$$

Як видно із формул (4.4), (4.7), вплив попередніх станів $\hat{R}_0^{(\bullet)}, \hat{R}_1^{(\bullet)}, \dots, \hat{R}_p^{(\bullet)}$ ФС (\bullet) при характеризуванні їх імовірністю безвідмовної роботи на прогнозований стан $\hat{R}_k^{(\bullet)}$ визначається порядком авторегресії p , який фактично задає поточне положення “ковзного” нуля, а інтенсивність відмов $\lambda_k^{(\bullet)}$ моделюється з використанням лише умови “марковськості” процесу, тобто приймається в проміжку між моментами часу $k-1$ та k сталою і рівною $\lambda_{k-1}^{(\bullet)}$.

Узагальнюючи все викладене вище, отримуємо такий алгоритм синтезу моделей оцінок характеристик $R(t)$, $\lambda(t)$ працездатності ФС трамваїв [103].

1. По журналах експлуатації ТТУ підраховуємо помісячно кількість відмов $n_f^{(\bullet)}$ кожної ФС трамваїв по всій їх множині, яка знаходилась в експлуатації протягом року, обраного в якості базового: отримаємо річний відрізок статистичного ряду

$$\{n_f^{(\bullet)}\} = \{n_{f1}^{(\bullet)}, n_{f2}^{(\bullet)}, n_{f3}^{(\bullet)}, n_{f4}^{(\bullet)}, n_{f5}^{(\bullet)}, n_{f6}^{(\bullet)}, n_{f7}^{(\bullet)}, n_{f8}^{(\bullet)}, n_{f9}^{(\bullet)}, n_{f10}^{(\bullet)}, n_{f11}^{(\bullet)}, n_{f12}^{(\bullet)}\}. \quad (4.10)$$

2. З використанням формули (1.6) визначаємо річний базовий відрізок статистичного ряду

$$\{R^{(\bullet)}\} = \{R_1^{(\bullet)}, R_2^{(\bullet)}, R_3^{(\bullet)}, R_4^{(\bullet)}, R_5^{(\bullet)}, R_6^{(\bullet)}, R_7^{(\bullet)}, R_8^{(\bullet)}, R_9^{(\bullet)}, R_{10}^{(\bullet)}, R_{11}^{(\bullet)}, R_{12}^{(\bullet)}\}. \quad (4.11)$$

3. З використанням формули (4.1) та відрізка ряду (4.11) визначаємо статистичну оцінку математичного очікування $\bar{\mu}_R^{(\bullet)}$ величини $R^{(\bullet)}$, підставляючи яку у вираз (4.3), отримаємо відрізок центровано-го часового ряду

$$\left\{ \hat{R}^{(\bullet)} \right\} = \left\{ \hat{R}_1^{(\bullet)}, \hat{R}_2^{(\bullet)}, \hat{R}_3^{(\bullet)}, \hat{R}_4^{(\bullet)}, \hat{R}_5^{(\bullet)}, \hat{R}_6^{(\bullet)}, \right. \\ \left. \hat{R}_7^{(\bullet)}, \hat{R}_8^{(\bullet)}, \hat{R}_9^{(\bullet)}, \hat{R}_{10}^{(\bullet)}, \hat{R}_{11}^{(\bullet)}, \hat{R}_{12}^{(\bullet)} \right\}. \quad (4.12)$$

4. За методикою, викладеною в [94, 97] з використанням статистичного ряду (4.12) синтезуємо авторегресійну модель оцінки характеристики $R_k^{(\bullet)}$ кожної ФС (\bullet) трамваїв у вигляді

$$\Phi(B) \hat{R}_k^{(\bullet)} = a_k, \quad (4.13)$$

де

$$\Phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p, \quad (4.14)$$

де B – оператор зсуву на один крок назад, яка є адекватною моделі (4.4).

5. В перший день поточного місяця за допомогою отриманих моделей (4.4) для кожної ФС трамваїв розраховуємо прогнозні оцінки імовірності їх безвідмовної роботи протягом цього місяця.

6. За допомогою формули (4.9) розраховуємо прогнозне значення інтенсивності відмов в поточному місяці кожної ФС.

7. За допомогою формули (1.10) визначаємо прогнозну на поточний місяць оцінку імовірності безвідмовної роботи усієї множини трамваїв ТТУ.

8. В кінці поточного місяця за формулою (1.6) уточнюємо оцінки характеристик $R_k^{(\bullet)}$ ФС трамваїв і доповнюємо ними відрізки статистичних рядів (4.11).

9. Далі переходимо до виконання пункту 3 алгоритму.

4.1.2. Синтез моделей оцінок характеристик працездатності функціональних систем трамваїв

За допомогою запропонованого алгоритму синтезуємо моделі оцінок характеристик $R^{(ГС, T)}(t)$, $\lambda^{(ГС, T)}(t)$ працездатності ГС трамваїв за графіком часового ряду, що характеризує процес відмов якої, наведеним на рис. 4.1.

1. Відрізок статистичного ряду, що характеризує процес відмов

$n_f^{(ГС, Т)}$, матиме вигляд

$$\{n_f^{(ГС, Т)}\} = \{15, 18, 9, 17, 19, 19, 15, 12, 13, 10, 10, 14\}. \quad (4.15)$$

2. За відрізком статистичного ряду (4.15) та формулою (1.6) отримаємо відрізок статистичного ряду

$$\{R^{(ГС, Т)}\} = \{0,86726; 0,84071; 0,92035; 0,84956; \\ 0,83186; 0,83186; 0,86726; 0,89381; \\ 0,88496; 0,9115; 0,9115; 0,87611\}. \quad (4.16).$$

3. Для відрізка ряду $\{R^{(ГС, Т)}\}$ (4.16) за формулами (4.1), (4.3) знайдемо, що

$$\mu_R^{-(ГС, Т)} = 0,87389,$$

а

$$\left\{ \hat{R}^{(ГС, Т)} \right\} = \{-0,00664; -0,03319; 0,04646; -0,02434; \\ -0,04204; -0,04204; -0,00664; 0,01991; \\ 0,01106; 0,03761; 0,03761; 0,00221\}.$$

4. За допомогою (4.2) визначимо всі необхідні автоковаріаційні характеристики $\gamma_{R(k)}^{-(ГС, Т)}$ статистичної оцінки $\hat{R}^{(ГС, Т)}$, а потім за відомою формулою [94, 97]

$$\rho_{R(k)}^{-(ГС, Т)} = \frac{\gamma_{R(k)}^{-(ГС, Т)}}{\gamma_{R(0)}^{-(ГС, Т)}}, \quad (4.17)$$

$$k = 1, 2, \dots, p$$

визначимо також всі необхідні для розв'язання рівнянь Юла-Уокера автокореляційні характеристики $\rho_{R(k)}^{-(ГС, Т)}$.

Їх масив матиме вигляд

$$\begin{cases} \gamma_{R(0)}^{-(\Gamma C, T)} = 9,0225 \cdot 10^{-4}; & \rho_{R(0)}^{-(\Gamma C, T)} = 1,0; \\ \gamma_{R(1)}^{-(\Gamma C, T)} = 2,38059 \cdot 10^{-4}; & \rho_{R(1)}^{-(\Gamma C, T)} = 0,26385; \\ \gamma_{R(2)}^{-(\Gamma C, T)} = 1,85997 \cdot 10^{-5}; & \rho_{R(2)}^{-(\Gamma C, T)} = 0,02061. \end{cases} \quad (4.18)$$

За цим масивом (4.18) згідно з методикою, викладеною в роботах [94, 97], знайдемо модель для оцінки $\hat{R}_k^{(\Gamma C, T)}$ у вигляді

$$\hat{R}_k^{(\Gamma C, T)} = 0,27775 \hat{R}_{k-1}^{(\Gamma C, T)} - 0,05267 \hat{R}_{k-2}^{(\Gamma C, T)} + a_k, \quad (4.19)$$

де a_k – імпульс білого шуму з дисперсією

$$D_a = 8,36129 \cdot 10^{-4}. \quad (4.20)$$

Із співвідношення (4.3) витікає, що для отримання повної моделі, за допомогою якої можна визначити прогнозне значення $R_k^{(\Gamma C, T)}$ на поточний місяць, необхідно рівняння (4.19) доповнити ще одним рівнянням, а саме

$$R_k^{(\Gamma C, T)} = 0,87389 + \hat{R}_k^{(\Gamma C, T)}. \quad (4.21)$$

5. За допомогою моделі (4.19), (4.20) з використанням комп'ютерної програми генерації імпульсів білого шуму з дисперсією (4.20), знайдемо, що прогнозне значення $\hat{R}_k^{(\Gamma C, T)}$ для січня 1999 року становитиме

$$\hat{R}_k^{(\Gamma C, T)} = 0,02698. \quad (4.22)$$

Підставляючи (4.22) в (4.21), матимемо прогнозне значення імовірності безвідмовної роботи ГС трамваїв в січні 1999 року на рівні

$$R_k^{(\Gamma C, T)} = 0,90088.$$

6. З використанням формули (4.7) для прогнозного значення інтенсивності відмов ГС в січні 1999 року отримаємо оцінку

$$\lambda_k^{(ГС, Т)} = -0,918. \quad (4.23)$$

Із виразу (4.23) ми переконуємося в тому, що дійсно дискретний аналог (4.7) формули (1.7) дає фізично неправильну оцінку інтенсивності відмов.

Але ніяких проблем не виникає, якщо використати формулу (4.9). Для $R_k = 0,90088$ матимемо

$$\lambda_k^{(ГС, Т)} = -\ln 0,90088 = 0,105,$$

що дає правильне розв'язання задачі як з математичної, так і з фізичної сторони.

Результати синтезу моделей оцінок характеристик працездатності інших ФС трамвая приведені в додатку А.

Використовуючи формулу (1.10) та дані додатку А, знайдемо імовірність безвідмовної роботи трамваїв:

$$R^{(Т)}(t) = 0,25422.$$

Отримані результати є цілком справедливі з огляду того, який середній вік вагонів.

4.2. Синтез математичних моделей для розрахунку запасних комплектів основних функціональних систем трамваїв

Для забезпечення надійної роботи трамвая необхідно мати відповідний комплект запасних елементів його основних ФС. Відмова будь-якої системи трамвая, коли комплект її запасних елементів вже використано, приводить до вимушеного простою трамвая, який супроводжується матеріальними збитками. З іншого боку, надлишок запасних елементів приводить до “заморожування” коштів і до невиправданих витрат. Тому задача визначення оптимального резерву запасних елементів на складі є актуальною.

Оскільки системи трамвая піддаються ремонтуванню, то будемо їх розглядати як клас відновлюваних елементів, тобто таких, які розраховані на багатократне відновлення працездатності шляхом заміни або ремонтування елементів, які відмовили, що повністю відповідає реальній ситуації, яка склалась у ТТУ.

Схема використання запасних елементів для трамвая у випадку відновлення елементів, які відмовили, візьмемо таку ж, яка запропонована в роботі [44] (рис. 4.3).

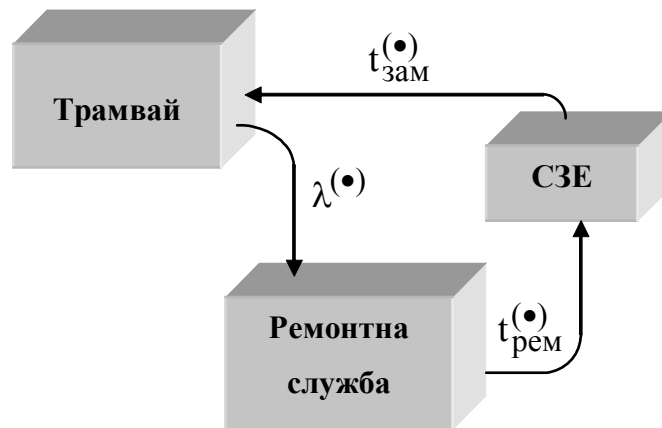


Рис. 4.3. Схема використання запасних елементів для трамвая

За цією схемою відмова елемента відбувається з інтенсивністю $\lambda^{(\bullet)}$. Він демонтується, ремонтується і поступає в склад запасних елементів (СЗЕ) протягом часу $t_{\text{рем}}^{(\bullet)}$. На його місце встановлюють інший елемент за час $t_{\text{зам}}^{(\bullet)}$.

4.2.1. Математичні моделі для визначення резервів запасних частин основних функціональних систем трамваїв без врахування імовірності відновлення систем

В якості критерію оптимізації виберемо техніко-організаційний [36], тобто в нашому випадку задаватимемося імовірністю того, що за деякий термін експлуатації трамвая його ФС відмовить не більше разів, ніж маємо запасних елементів в наявності.

Легко бачити, що із зростанням інтенсивності відмов $\lambda^{(\bullet)}$ і часу відновлення $t_{\text{відн}}^{(\bullet)}$ працездатності системи зростає і кількість запасних елементів, необхідних для забезпечення безперебійної експлуатації. Очевидним також є те, що число z запасних елементів використаних із комплекту запасних елементів за час експлуатації T_e можна покласти рівним числу відмов, які виникли в системі за цей же період. За таких умов імовірність того, що за час T_e буде потрібно z запасних елементів можна розрахувати за формулою Пуассона [44, 45]:

$$R^{(\bullet)}(T_e) = \frac{(\lambda^{(\bullet)} T_e)^z}{z!} e^{-\lambda^{(\bullet)} T_e}, \quad (4.24)$$

де $z = 0, 1, 2, \dots$, а імовірністю того, що їх потрібно буде не менше z –

$$R_z^{(\bullet)} = e^{-\lambda^{(\bullet)} T_e} \sum_{n=0}^z \frac{(\lambda^{(\bullet)} T_e)^n}{n!}, \quad (4.25)$$

де n – кількість відмов за час T_e .

У виразі (4.25) прийнято, що ремонтна бригада встигає повністю відновити відмовлену систему за період розгляду.

Середнє значення запасних елементів, які будуть використані за час експлуатації T_e , як показано в роботі [45], можна визначити з виразу

$$z_{\text{ср}}^{(\bullet)} = \sum_{z=1}^{\infty} z \frac{(\lambda^{(\bullet)} T_e)^z}{z!} e^{-\lambda^{(\bullet)} T_e}, \quad (4.26)$$

який базується на формулі (4.25).

Очевидно, що в процесі експлуатації трамвая може знадобитись інша кількість запасних елементів, ніж $z_{\text{ср}}^{(\bullet)}$. Тому для знаходження потрібного значення z запасних елементів необхідно задатися імовірністю $R_z^{(\bullet)}$ того, що за час T_e станеться не більше n відмов (при цьому ми будемо вважати, що ремонтна бригада відремонтує елементи, які вийшли з ладу ще до того, як закінчиться запас).

Узагальнюючи викладене вище, отримуємо наступний алгоритм [104] визначення запасних елементів систем трамваїв, який базується на алгоритмі, отриманому в роботі [44].

1. Задаємося необхідною імовірністю $R_{z_{\text{необх}}}^{(\bullet)}$ безвідмовної роботи ФС трамвая.

2. Задаючись періодом T_e поповнення складських запасів, з використанням формули (4.26) знаходимо прогнозоване середнє значення $z_{\text{ср}}^{(\bullet)}$ запасних елементів для системи за час T_e .

3. Підставляючи у формулу (4.25) замість добутку $\lambda^{(\bullet)} T_e$ числове значення $z_{\text{ср}}^{(\bullet)}$, отримаємо ряд $R_z^{(\bullet)}$ ймовірностей системи, який характеризує з якою ймовірністю протягом терміну поповнення T_e виникне не більше відмов, ніж z запасних елементів.

4. Розраховуємо величину допустимої недостатності запасних елементів:

$$R_{z_{\text{доп}}}^{(\bullet)} = 1 - R_z^{(\bullet)}. \quad (4.27)$$

5. З ряду $R_z^{(\bullet)}$ ймовірностей необхідно визначити значення R_z , яке менше допустимої недостатності запасних елементів $R_z^{(\bullet)}_{\text{доп}}$ й відповідну цій недостатності кількість запасних елементів системи.

За допомогою запропонованого алгоритму знайдемо необхідну кількість запасних елементів для ГС одного трамвая.

Задаємося імовірністю безвідмовної роботи ГС трамвая на рівні $R_z^{(ГС, T)} = 0,995$.

Плануємо поповнювати складські запаси запасних елементів щомісяця, тобто $T_e = 1$ місяць, що суттєво більше часу відновлення однієї гальмівної системи, але є не більшим організаційно встановленого терміну поповнення запасів.

За формулою (4.26) знаходимо прогнозоване середнє $z_{\text{ср}}^{(ГС, T)}$ запасних елементів для гальмівної системи трамвая з інтенсивністю відмов $\lambda_{\text{ср}}^{(ГС, T)} = 0,105$ [104]:

$$z_{\text{ср}}^{(ГС, T)} = 0,105 \text{ комплекти.}$$

Хоча кількість комплектів і повинна бути тільки цілим додатним числом, але для точності подальших розрахунків збережемо значення після коми.

Підставляючи у формулу (4.25) замість добутку $\lambda^{(\bullet)} T_e$ числове значення $z_{\text{ср}}^{(ГС, T)} = 0,105$, отримаємо ряд ймовірностей $R_z^{(ГС, T)}$, який для зручності зведемо в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення імовірності $R_z^{(ГС, T)}$ $n \geq z$					
z	0	1	2	3	...
$R_z^{(ГС, T)}$	1	0,09968	0,00514	0,00018	...

Визначаємо за формулою (4.35) допустиму недостатність:

$$R_z^{(ГС, T)}_{\text{доп}} = 1 - 0,995 = 0,005. \quad (4.28)$$

З табл. 4.1 визначаємо значення імовірності, менше допустимої недостатності $R_z^{(ГС, T)}_{\text{доп}}$ запасних елементів. Воно рівне 0,00018. Йому

відповідає z , рівне 3. Тому на складі запасних елементів необхідно мати 3 запасних комплекти ГС трамвая. При такій кількості запасних елементів імовірність того, що за місяць виникне більше трьох відмов, дорівнює 0,00018, що менше допустимої недостатності 0,005.

Для розрахунку запасних комплектів системи для всіх трамваїв Вінницького ТТУ можна визначити, замінивши величину інтенсивності відмов $\lambda^{(\bullet)}$ параметром потоку відмов

$$\Lambda^{(\bullet)} = \lambda^{(\bullet)} \cdot N_c, \quad (4.29)$$

де N_c – кількість ФС.

Якщо припустити, що з наявних в трамвайному депо 113 трамваїв на маршрути виходять максимум 100 трамваїв, тобто $N = 100$, то параметр потоку відмов для гальмівної системи трамваїв становитиме

$$\Lambda^{(ГС, Т)} = 0,105 \cdot 100 = 10,5.$$

За таких умов на складі необхідно мати 21 запасних комплекти ГС для всіх трамваїв. В такому випадку імовірність того, що за місяць виникне більше 21 відмов, дорівнює 0,0028, що задовольняє нашим вимогам.

4.2.2. Математичні моделі для визначення резервів запасних частин основних функціональних систем трамваїв з врахуванням імовірності відновлення систем

4.2.2.1. Постановка задачі

За відомою методикою розрахунку резервів ЗЧ, описаною в роботі [45], необхідну кількість комплектів ЗЧ визначають без врахування процесу відновлення, тобто припускають, що ремонтний орган встигає повністю відновити відмовлені системи за час експлуатації T_e працюючих. За таких умов імовірність виконання системою своїх функцій протягом часу $T_e^{(\bullet)}$ при наявності $z^{(\bullet)}$ запасних частин дорівнюватиме [45]:

$$R_{z^{(\bullet)}}^{(\bullet)} = e^{-\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)}} \sum_{n=0}^{z^{(\bullet)}} \frac{(\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)})^n}{n!}, \quad (4.30)$$

Згідно з цією методикою середнє значення кількості ЗЧ деякої системи та імовірність того, що за час $T_e^{(\bullet)}$ буде більше відмов системи,

ніж є в наявності запасних комплектів $z^{(\bullet)}$, пропонується розраховувати відповідно, як [45]

$$Z_{cp}^{(\bullet)} = e^{-\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)}} \cdot \sum_{z^{(\bullet)}=1}^{\infty} z^{(\bullet)} \cdot \frac{(\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)})^2}{z^{(\bullet)}!}, \quad (4.31)$$

$$P_z^{(\bullet)} = e^{-Z_{cp}^{(\bullet)}} \sum_{n=0}^{z^{(\bullet)}} \frac{(Z_{cp}^{(\bullet)})^n}{n!}. \quad (4.32)$$

Але із практики відомо, що відновлення ремонтним органом деякої системи за час $T^{(\bullet)}$ до виходу з ладу системи, яка експлуатується, не завжди має місце, тобто якась кількість відмовлених систем за цей проміжок часу не встигає відновлюватись. А це означає, що можлива ситуація, при якій деякі трамваї будуть простоювати через нестачу ЗЧ, кількість яких розрахована за формулою (4.31). Тому доцільно орієнтуватися на якусь іншу величину, а не на $Z_{cp}^{(\bullet)}$, тобто необхідним є врахування в розрахунковій формулі такого параметру відновлення ремонтним органом відмовлених систем, який би задавав кількість ЗЧ з пересторогою [105].

В роботі [45] запропоновано один із підходів розв'язання цієї задачі шляхом введення коефіцієнту запасу

$$k_z = \frac{Z_p}{Z_{cp}}, \quad (4.33)$$

де Z_p – число запасних частин, які гарантують працездатність системи з імовірністю

$$P_{zp} = e^{-Z_{cp}} \sum_{i=0}^{Z_p} \frac{Z_{cp}^i}{i!}. \quad (4.34)$$

Саме на співвідношенні (4.33) в роботі [45] побудована методика знаходження значення Z_p в функції від P_{zp} , яке задає потрібний рівень коефіцієнта запасу k_z , тобто дозволяє визначити середню кількість ЗЧ з пересторогою.

Але, на наш погляд, і цей підхід не є адекватним задачі, оскільки

ніяк не враховує імовірність $\Theta^{(\bullet)}$ відновлення за час $T_e^{(\bullet)}$ ремонтним органом відновлених систем.

Тож пропонується саме такий підхід, який дозволяє врахувати імовірність $\Theta^{(\bullet)}$.

4.2.2.2. Побудова розрахункових співвідношень

Придивимось уважно до формули (4.31). Вона є математичним очікуванням випадкової величини z і задає статистичну оцінку її середнього значення.

Очевидно, що якби в цій формулі ми замість $z^{(\bullet)}$ взяли $\frac{1}{\Theta^{(\bullet)}} z^{(\bullet)}$, то за її допомогою вже обчислили б не строго середнє значення $Z_{\text{ср}}$, а трохи більше ніж середнє, оскільки значення $\Theta^{(\bullet)}$ завжди є хоч трошки, але меншим від одиниці.

Якщо ж в формулі (4.31) замість $z^{(\bullet)}$ взяти $\left(\frac{1}{\Theta^{(\bullet)}}\right)^{z^{(\bullet)}} z^{(\bullet)}$, то отримаємо потрібне середнє число ЗЧ $Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)}$ ще з більшою пересторогою. Але, що важливо, ця пересторога є абсолютно об'єктивною, оскільки ми її вводимо в функції від імовірності відновлення $\Theta^{(\bullet)}$ і кількості потрібних ЗЧ [105].

Таким чином замість використання для обчислення середньої кількості потрібних ЗЧ формули (4.31) з введенням коефіцієнту запасу, виходячи з формул (4.33), (4.34), пропонується $Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)}$ знаходити із співвідношення [105]

$$Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)} = e^{-\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)}} \cdot \sum_{z^{(\bullet)}=1}^{\infty} \left[\left(\frac{1}{\Theta^{(\bullet)}} \right)^{z^{(\bullet)}} \cdot z^{(\bullet)} \cdot \frac{(\Lambda^{(\bullet)} T_e^{(\bullet)})^z}{z^{(\bullet)}!} \right]. \quad (4.35)$$

Формула (4.35) дозволяє розраховувати середнє значення з пересторогою $Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)}$ запасних частин системи (\bullet) , тобто кожному значенню ЗЧ $z^{(\bullet)}$ відповідає деякий коефіцієнт запасу. Як бачимо, чим менша імовірність відновлення системи $\Theta^{(\bullet)}$, тим більше число ЗЧ потрібно мати.

В цьому випадку імовірність того, що за час $T_e^{(\bullet)}$ буде більше від-

мов системи, ніж є в наявності запасних комплектів $z^{(\bullet)}$, будемо розраховувати не за формулою (4.32), а за її модифікацією:

$$R_z^{(\bullet)} = e^{-Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)}} \sum_{n=0}^{z^{(\bullet)}} \frac{\left(Z_{\text{ср пр}}^{(\bullet)}\right)^n}{n!}. \quad (4.36)$$

Як і в роботі [45] вважаємо, що час відновлення систем трамваїв розподілений по експоненціальному закону, а тому імовірність $\Theta^{(\bullet)}$ відновлення системи (\bullet) за час $\tau^{(\bullet)}$ виражається запропонованим в роботі [45] співвідношенням:

$$\Theta^{(\bullet)}(\tau^{(\bullet)}) = 1 - \left(1 + 2 \cdot \frac{\tau^{(\bullet)}}{\tau_c^{(\bullet)}}\right) \cdot e^{-2 \cdot \frac{\tau^{(\bullet)}}{\tau_c^{(\bullet)}}}, \quad (4.37)$$

де $\tau_c^{(\bullet)}$ – середній час відновлення системи (\bullet) .

А далі, задавшись величиною допустимої недостатності ЗЧ $P_z^{(\bullet)}_{\text{доп}}$, як показано в роботі [44], та використовуючи співвідношення (4.35)÷(4.37), можна визначити відповідну їй кількість ЗЧ для кожної системи трамваїв. Покажемо це на прикладі.

4.2.2.3. Приклад розрахунку запасних частин для релейно-контакторної системи трамваїв

Приклад розрахунку ЗЧ покажемо на РКС трамваїв, використовуючи обидві методики.

В якості середнього часу відновлення деякої системи $\tau_c^{(\bullet)}$ будемо брати час середнього ремонту, а в якості величини часу відновлення $\tau^{(\bullet)}$ – час капітального ремонту згідно нормативів Вінницького ТТУ [106]. Для РКС ці величини відповідно становлять: $\tau^{(\text{РКС, Т})} = 8,94$ год. та $\tau_c^{(\text{РКС, Т})} = 5,53$ год.

Підставивши параметри $\tau_c^{(\text{РКС, Т})}$ та $\tau^{(\text{РКС, Т})}$ у вираз (4.37), отримаємо імовірність відновлення РКС за час 8,94 год. на рівні

$$\Theta^{(\text{РКС, Т})} = 1 - \left(1 + 2 \cdot \frac{8,94}{5,53}\right) \cdot e^{-2 \cdot \frac{8,94}{5,53}} = 0,833. \quad (4.38)$$

Залежність імовірності відновлення РКС від часу відновлення ($\tau^{(PKC, T)} = 0, 20$ год.) подано графічно на рис. 4.4.

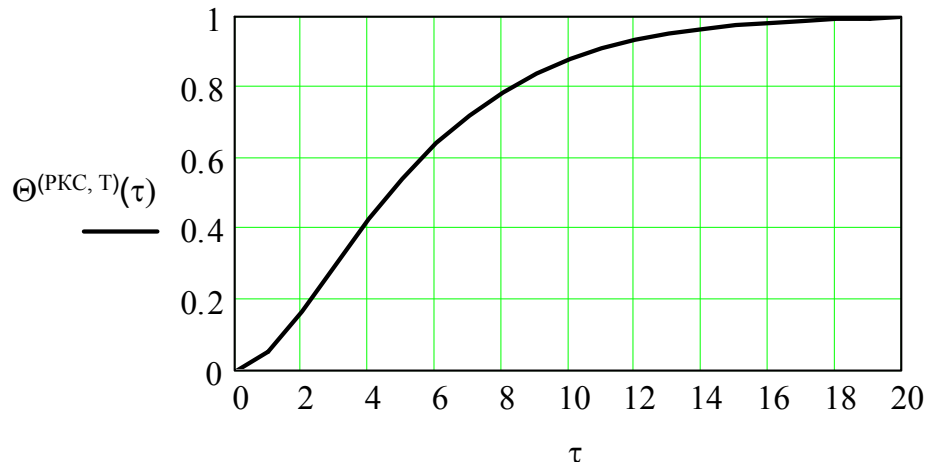


Рис. 4.4. Залежність імовірності відновлення РКС трамваїв від часу відновлення

Інтенсивність відмов РКС $\lambda^{(PKC, T)}$ візьмемо з табл. А.1.3: $\lambda^{(PKC, T)} = 0,3908$ місяць⁻¹.

Параметр потоку відмов для РКС трамваїв

$$\Lambda^{(PKC, T)} = 0,3908 \cdot 100 = 39,08. \quad (4.39)$$

Необхідну кількість запасних комплектів для деякої системи будемо визначати для терміну відновлення ремонтним органом відмовлених систем даного типу. В такому випадку $T_e^{(\bullet)} = \tau^{(\bullet)}$. Однак час відновлення системи має розмірність $[\tau] = \text{год.}$, а інтенсивність відмов – $[\lambda] = \text{місяць}^{-1}$, тому час експлуатації $T_e^{(\bullet)}$ приведемо до вигляду

$$T_e^{(\bullet)} = \frac{\tau^{(\bullet)}}{480}, \quad (4.40)$$

в якому враховано, що місяць має 30 днів, протягом яких трамваї працюють в дві зміни по 8 год. кожна.

Для РКС трамваїв $T^{(PKC, T)} = 0,019$ міс.

Середнє значення запасних частин $Z_{\text{ср}}^{(PKC, T)}$ та середнє значення з

пересторогою $Z_{\text{ср пр}}^{(\text{PKC}, T)}$ згідно (4.31) та (4.35) набувають значення:

$$Z_{\text{ср}}^{(\text{PKC}, T)} = 0,7278 \text{ компл.} \quad Z_{\text{ср пр}}^{(\text{PKC}, T)} = 1,0108 \text{ компл.} \quad (4.41)$$

Хоча кількість комплектів і повинна бути тільки цілим додатним числом, але для подальших розрахунків збережемо дробі.

Підставляючи у формули (4.32) та (4.36) відповідні числові значення $Z_{\text{ср}}^{(\text{PKC}, T)}$ і $Z_{\text{ср пр}}^{(\text{PKC}, T)}$ (4.41), отримаємо ряд ймовірностей того, що за час $T_e^{(\text{PKC}, T)}$ буде більше відмов системи, ніж є в наявності запасних комплектів z (рис. 4.5), які для зручності зведемо до табл. 4.2.

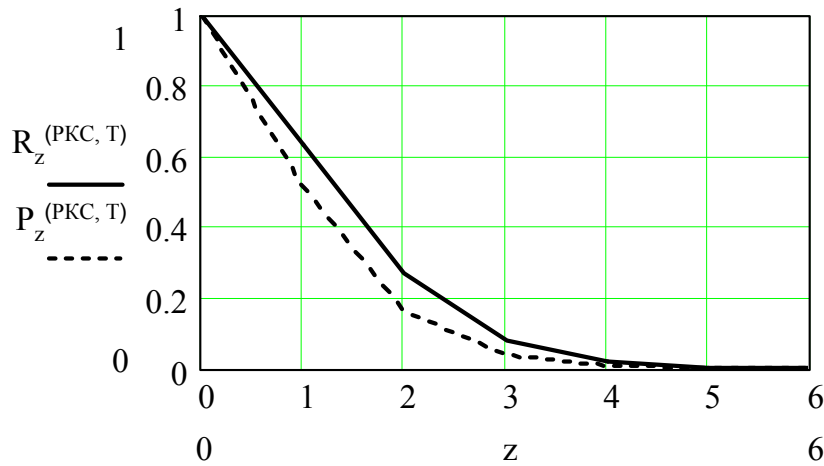


Рис. 4.5. Імовірність того, що за час $T_e^{(\text{PKC}, T)}$ буде більше відмов РКС трамваїв, ніж є в наявності запасних комплектів z

Проаналізуємо результат (4.41). Видно, що вони відрізняються один від одного майже на 30%.

Таблиця 4.2

Імовірність того, що за час $T_e^{(\text{PKC}, T)}$ буде більше відмов системи, ніж є в наявності запасних комплектів z

z	0	1	2	3	4	5	6
$R_z^{(\text{PKC}, T)}$	1	0,6361	0,2682	0,0823	0,0197	0,0038	0,0006
$P_z^{(\text{PKC}, T)}$	1	0,517	0,1655	0,0376	0,0066	0,0009	0,0001

Нагадаємо, що розрахунок був проведений по відношенню до часу

$T_e^{(PKC, T)} = 0,019$ міс. Але ж запасні частини поповнюються на складі не рідше ніж один раз на місяць. Тож отримані числа 0,7278 і 1,0108 потрібно, приводячи до місячної потреби, збільшити в 50 разів, тобто розглядати

$$Z_{cp}^{(PKC, T)} \cong 36 \text{ компл.} \quad Z_{cp \text{ пр}}^{(PKC, T)} \cong 51 \text{ компл.} \quad (4.42)$$

Із (4.42) добре видно різниця між існуючим та запропонованим підходами.

Розглянемо випадки з різними ймовірностями відновлення системи. Результати розрахунків показані на рис. 4.6.

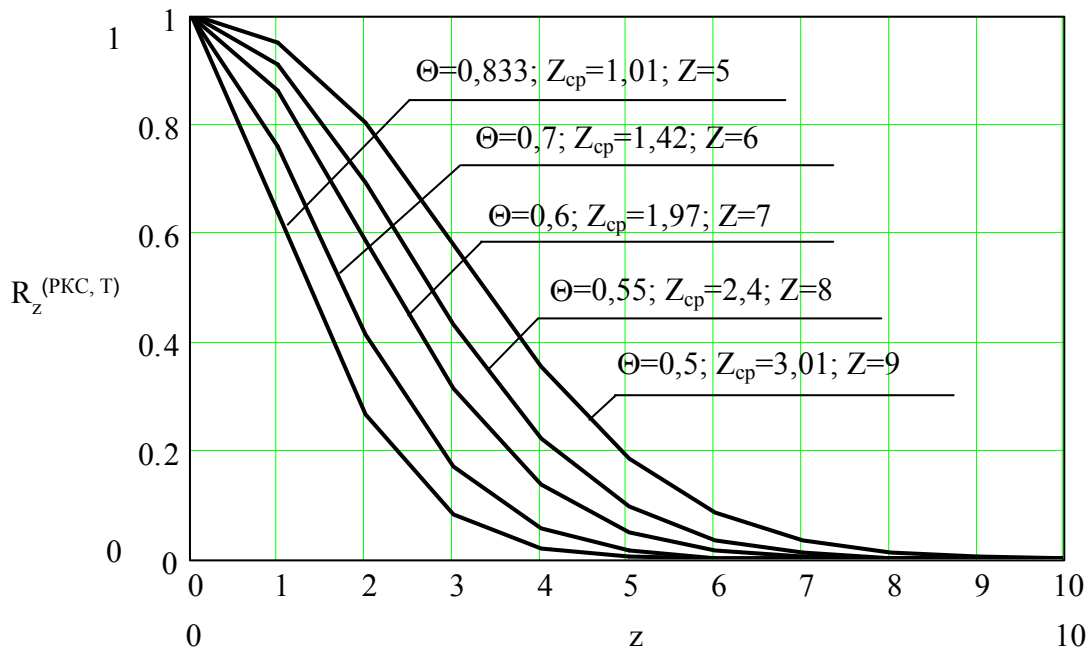


Рис. 4.6. Імовірність того, що за час $T_e^{(PKC, T)}$ буде більше відмов РКС трамвая, ніж є в наявності запасних комплектів z при різних ймовірностях відновлення системи

З даного рисунку видно, що необхідна кількість запасних комплектів суттєво залежить від імовірності відновлення системи. Тому й визначення кількості ЗЧ потрібно здійснювати з врахуванням функціональної здатності ремонтного органу [105].

Аналогічно до розрахунку запасних комплектів РКС трамваїв можна визначити необхідну кількість запасних комплектів і для інших систем трамваїв. Результати розрахунків наведені в додатку Б.

4.3. Висновки

1. Запропоновано новий підхід до синтезу математичних моделей оцінок характеристик працездатності ФС трамваїв та алгоритм його реалізації, які дозволяють враховувати заміни елементів, які вийшли з ладу в системах, та зміни умов їх функціонування.

2. З використанням запропонованого підходу синтезовано математичні моделі оцінок таких характеристик працездатності основних ФС трамваїв, як імовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов.

3. Адаптовано алгоритм розрахунку обсягу запасних елементів для ФС трамвая без врахування імовірності відновлення систем.

4. З використанням розробленого алгоритму визначено кількість запасних комплектів для ГС трамваїв.

5. Узагальнено метод розрахунку обсягу запасних комплектів шляхом введення в розрахункові формули залежності від імовірності відновлення відмовлених систем.

6. Розраховано необхідні запасні комплекти основних ФС трамваїв.

РОЗДІЛ 5

СИНТЕЗ СТРУКТУР СИСТЕМ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ МІСЬКИХ ТРАМВАЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ

5.1. Синтез структури системи технічної діагностики електричного двигуна

Діагностувати параметри ізоляції найбільш вигідно тими методами, які можна використовувати на працюючому обладнанні. До них відноситься метод вимірювання струму, який споживається з мережі електричним двигуном, із його наступним перерахунком у виділене тепло і відповідним старінням ізоляції. Інший метод базується на вимірюванні температури найбільш нагрітої точки електричного двигуна з наступним її перерахунком на робочий ресурс, що залишився, ізоляції.

Однак пристрої, що реалізовані з використанням обох цих методів [107-112], мають ряд похибок. Тому необхідно здійснити розробку нового пристрою, який би усунув недоліки існуючих (в даному випадку пристроїв [107-112]). Це можна зробити, поєднавши вище вказані методи, тобто використовуючи комбінований метод. Тому діагностування робочого ресурсу електродвигуна будемо здійснювати, контролюючи температуру обмотки якоря і струм, що споживаються з мережі, а також швидкість зміни температури.

Для синтезу системи пропонується використання апарату секвенцій [113-116].

Враховуючи складність структури системи діагностування, що синтезується, в якості прикладу покажемо процес синтезу для двох значень струму I_1 та I_2 ($I_1 < I_2$), для двох значень температури t_1^0 та t_2^0 ($t_1^0 > t_2^0$), а також для двох значень добутку цих параметрів $I_1 t_1^0$ та $I_2 t_2^0$ ($I_1 t_1^0 < I_2 t_2^0$), застосовуючи апарат секвенцій.

Для того, щоб фіксувати вище вказані параметри, будемо використовувати тригери. Позначимо $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ – тригери, які фіксують параметри $I_1, I_2, t_1^0, t_2^0, I_1 t_1^0, I_2 t_2^0$ відповідно. Оскільки при різних значеннях температури та струму в лічильник залишкового ресурсу двигуна повинні поступати різні кількості імпульсів, то для подачі цих імпульсів в лічильник введемо відповідні елементи часової затримки на перемикання (τ_1 і τ_2 у відповідності з T_1 ; τ_3 і τ_4 у відповідності з T_2 ; τ_5 і τ_6 у відповідності з T_3 ; τ_7 і τ_8 у відповідності з T_4 ; τ_9 і τ_{10} у відповідності з T_5 ; τ_{11} і τ_{12} у відповідності з T_6 . Елементи $\tau_1, \tau_3, \tau_5, \tau_7, \tau_9,$

τ_{11} характеризують тривалість одного імпульсу, а $\tau_2, \tau_4, \tau_6, \tau_8, \tau_{10}, \tau_{12}$ – паузи між імпульсами [117].

Інакше кажучи, з допомогою трійок $(T_1, \tau_1, \tau_2); (T_2, \tau_3, \tau_4); (T_3, \tau_5, \tau_6); (T_4, \tau_7, \tau_8); (T_5, \tau_9, \tau_{10}); (T_6, \tau_{11}, \tau_{12})$ моделюємо генератори імпульсів з різними частотами $f_{ч1}, f_{ч2}, f_{ч3}, f_{ч4}, f_{ч5}, f_{ч6}$, причому $f_{ч1} < f_{ч2}; f_{ч3} > f_{ч4}; f_{ч5} < f_{ч6}$. Оскільки $f_{ч1} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_2}, f_{ч2} = \frac{1}{\tau_3 + \tau_4}, f_{ч3} = \frac{1}{\tau_5 + \tau_6}, f_{ч4} = \frac{1}{\tau_7 + \tau_8}, f_{ч5} = \frac{1}{\tau_9 + \tau_{10}}, f_{ч6} = \frac{1}{\tau_{11} + \tau_{12}}$, то для нормального

функціонування цих генераторів імпульсів достатньо вибрати елементи часової затримки з такими співвідношеннями по тривалості сигналів (а не по логічному значенню) $\tau_1 = \tau_3 = \tau_5 = \tau_7 = \tau_9 = \tau_{11}; \tau_2 > \tau_4; \tau_6 < \tau_8; \tau_{10} > \tau_{12}; \tau_3 < \tau_4; \tau_5 < \tau_6; \tau_{11} < \tau_{12}; \tau_{12} < \tau_4 < \tau_6$.

Для запам'ятовування імпульсів введемо ще тригери T_7, T_8, T_9, T_{10} , з допомогою яких моделюється лічильник імпульсів врахування залишкового ресурсу двигуна. Для нормального функціонування такого лічильника імпульсів необхідно ввести три елементи часової затримки, які повинні стояти між сусідніми тригерами T_7 і T_8, T_9 і T_{10} .

З метою обнулювання тригерів T_7-T_{10} (в моделі лічильника) і підготовки їх до робочого циклу в граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування додамо ще одну гілку, що описує сигнал F^* , який подається в структуру системи діагностування в момент подачі напруги живлення. Логічна змінна виходу $y=0$ відповідає тому, що ізоляція обмотки ще в межах норми, або лічильник імпульсів ще не обнулився. В протилежному випадку $y=1$.

З врахуванням наведених викладок граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування електродвигуна має вигляд, зображений на рис. 5.1.

На цьому рисунку числами (від 0 до 28) позначені стани (наприклад, цифрі 0 відповідає стан S_0); y або \bar{y} – вихідна змінна. Для компактності позначимо $X_{i,j}$ – узагальнена вхідна змінна, при якій система переходить із стану S_i в стан S_j .

Аналітично функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностики, представлений у вигляді графа на рис. 5.1, може бути описаний такою системою секвенцій:

$$\begin{aligned} F^* &\vdash S_0; & X_{4,11}S_4 &\vdash S_{11}; & X_{6,20}S_6 &\vdash S_{20}; \\ X_{0,0}S_0 &\vdash S_0; & X_{11,6}S_{11} &\vdash S_6; & X_{20,8}S_{20} &\vdash S_8; \\ X_{0,1}S_0 &\vdash S_1; & X_{6,12}S_6 &\vdash S_{12}; & X_{0,21}S_0 &\vdash S_{21}; \end{aligned}$$

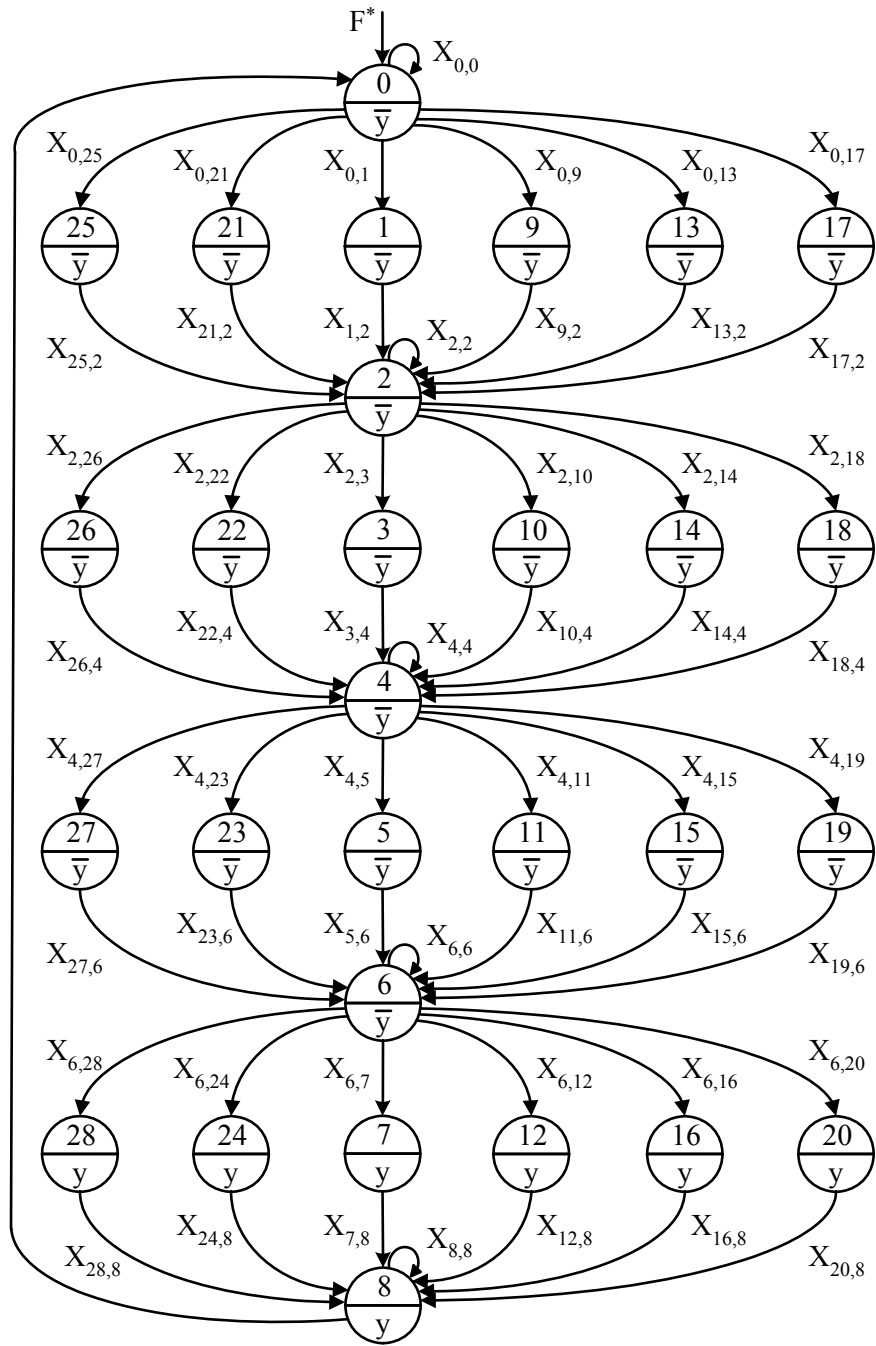


Рис. 5.1. Граф функціонування блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування електродвигуна

$$\begin{array}{lll}
 X_{1,2}S_1 \vdash S_2; & X_{12,8}S_{12} \vdash S_8; & X_{21,2}S_{11} \vdash S_2; \\
 X_{2,2}S_2 \vdash S_2; & X_{0,13}S_0 \vdash S_{13}; & X_{2,22}S_2 \vdash S_{22}; \\
 X_{2,3}S_2 \vdash S_3; & X_{13,2}S_{13} \vdash S_2; & X_{22,4}S_{22} \vdash S_4; \\
 X_{3,4}S_3 \vdash S_4; & X_{2,14}S_2 \vdash S_{14}; & X_{4,23}S_4 \vdash S_{23}; \\
 X_{4,4}S_4 \vdash S_4; & X_{14,4}S_{14} \vdash S_4; & X_{23,6}S_{23} \vdash S_6;
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
& X_{4,5}S_4 \vdash S_5; & X_{4,15}S_4 \vdash S_{15}; & X_{6,24}S_6 \vdash S_{24}; \\
& X_{5,6}S_0 \vdash S_6; & X_{15,6}S_{15} \vdash S_6; & X_{24,8}S_{24} \vdash S_8; \\
& X_{6,6}S_6 \vdash S_6; & X_{6,16}S_6 \vdash S_{16}; & X_{0,25}S_0 \vdash S_{25}; \\
& X_{6,7}S_6 \vdash S_7; & X_{16,8}S_{16} \vdash S_8; & X_{25,2}S_{25} \vdash S_2; \\
& X_{7,8}S_7 \vdash S_8; & X_{0,17}S_0 \vdash S_{17}; & X_{2,26}S_2 \vdash S_{26}; \\
& X_{8,8}S_8 \vdash S_8; & X_{17,2}S_{17} \vdash S_2; & X_{26,4}S_{26} \vdash S_4; \\
& X_{8,0}S_8 \vdash S_0; & X_{2,18}S_2 \vdash S_{18}; & X_{4,27}S_4 \vdash S_{27}; \\
& X_{0,9}S_0 \vdash S_9; & X_{18,4}S_{18} \vdash S_4; & X_{27,6}S_{27} \vdash S_6; \\
& X_{9,2}S_9 \vdash S_2; & X_{4,19}S_4 \vdash S_{19}; & X_{6,28}S_6 \vdash S_{28}; \\
& X_{2,10}S_2 \vdash S_{10}; & X_{19,6}S_{19} \vdash S_6; & X_{28,8}S_{28} \vdash S_8; \\
& X_{10,4}S_{10} \vdash S_4; \\
& S_7 \vee S_8 \vee S_{12} \vee S_{16} \vee S_{20} \vee S_{24} \vee S_{28} \vdash y; \\
& S_0 \vee S_1 \vee S_2 \vee S_3 \vee S_4 \vee S_5 \vee S_6 \vee S_9 \vee S_{10} \vee S_{11} \vee S_{13} \vee S_{14} \vee S_{15} \vee \\
& \vee S_{17} \vee S_{18} \vee S_{19} \vee S_{21} \vee S_{22} \vee S_{23} \vee S_{25} \vee S_{26} \vee S_{27} \vdash \bar{y}.
\end{aligned} \tag{5.1}$$

У виразах (5.1):

$$\begin{aligned}
X_{0,0} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0; & X_{15,6} &= \tau_5; \\
X_{0,1} &= I_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_2; & X_{6,16} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_6; \\
X_{1,2} &= \tau_1; & X_{16,8} &= \tau_5; \\
X_{2,2} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0; & X_{0,17} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_8; \\
X_{2,3} &= I_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_2; & X_{17,2} &= \tau_7; \\
X_{3,4} &= \tau_1; & X_{2,18} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_8; \\
X_{4,4} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0; & X_{18,4} &= \tau_7; \\
X_{4,5} &= I_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_2; & X_{4,19} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_8; \\
X_{5,6} &= \tau_1; & X_{19,6} &= \tau_7; \\
X_{6,6} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0; & X_{6,20} &= \bar{I}_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_8; \\
X_{6,7} &= I_1 \bar{I}_2 \bar{t}_1^0 \bar{t}_2^0 \bar{I}_1 \bar{t}_1^0 \bar{I}_2 \bar{t}_2^0 \tau_2; & X_{20,8} &= \tau_7;
\end{aligned}$$

$$\begin{array}{ll}
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_9; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{24}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{10}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{25}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{11}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{26}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{12}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{27}; \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{13}; & \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{28}. \\
\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \overline{T_{10}} \in S_{14}; &
\end{array} \tag{5.3}$$

Підставляючи вирази (5.2) і (5.3) в (5.1), отримаємо таку систему секвенцій:

$$\begin{array}{l}
F \vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\overline{I_1 I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
I_1 \overline{I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \tau_2 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\tau_1 T_1 \overline{T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\overline{I_1 I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
I_1 \overline{I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \tau_2 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\tau_1 T_1 \overline{T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\overline{I_1 I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
I_1 \overline{I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \tau_2 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\tau_1 T_1 \overline{T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
\overline{I_1 I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
I_1 \overline{I_2 t_1^0 t_2^0 I_1 t_1^0 I_2 t_2^0} \tau_2 \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}} \vdash \\
\vdash \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9 T_{10}};
\end{array}$$

85

[illegible]

[illegible]

Очевидно, що отримана система секвенційних виразів (5.4) вийшла досить громіздкою, тому необхідно здійснити її мінімізацію, використовуючи деякі властивості секвенцій, які обґрунтовані в [113].

Після перетворення і мінімізації секвенційні вирази системи (5.4) набудуть такого вигляду [117]:

$$\begin{aligned}
& I_1 \tau_2 \overline{T_1} \vdash T_1; \\
& \tau_1 T_1 \vdash \overline{T_1}; \\
& I_2 \tau_4 \overline{T_2} \vdash T_2; \\
& \tau_3 T_2 \vdash \overline{T_2}; \\
& t_1^0 \tau_6 \overline{T_3} \vdash T_3; \\
& \tau_5 T_3 \vdash \overline{T_3}; \\
& t_2^0 \tau_8 \overline{T_4} \vdash T_4; \\
& \tau_7 T_4 \vdash \overline{T_4}; \\
& I_1 t_1^0 \tau_{10} \overline{T_5} \vdash T_5; \\
& \tau_9 T_5 \vdash \overline{T_5}; \\
& I_2 t_2^0 \tau_{12} \overline{T_6} \vdash T_6; \\
& \tau_{11} T_6 \vdash \overline{T_6}; \\
& T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6 \vdash T_7; \\
& \tau_{12} (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6) T_7 \vdash T_8;
\end{aligned} \tag{5.5}$$

$$\begin{aligned}
&\tau_{12}(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6)T_8 \vdash T_9; \\
&\tau_{12}(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4 \vee T_5 \vee T_6)T_9 \vdash T_{10}; \\
&\quad F^* \vdash \overline{T_7 T_8 T_9 T_{10}}; \\
&\quad T_7 T_8 T_9 T_{10} \vdash y.
\end{aligned}$$

На основі отриманої секвенційної моделі (5.5) синтезуємо структурну схему системи діагностування електричних двигунів.

Перший етап синтезу полягає в побудові структурної схеми, яка реалізує систему секвенційних рівнянь моделі у вигляді (5.1). Кожна з цих секвенцій реалізується схемою співпадання, на входи яких подаються сигнали, що відповідають кодовій комбінації лівої частини секвенцій, і двостабільним елементам, до входу яких через діодну матрицю під'єднаний вихід схеми співпадання. Якщо код стану двостабільного елемента в правій частині секвенцій не має знаку інверсії, то вихід схеми співпадання з'єднується з прямим входом двостабільного елемента. У випадку наявності інверсії в коді стану вихід схеми співпадання з'єднується з інверсним входом двостабільного елемента.

Схема, побудована по секвенціальній моделі (5.1), приведена на рис. 5.2. Вхідні сигнали і сигнали стану поступають на схеми співпадання. Кожному виходу зі схем співпадання відповідає свій рядок в діодній матриці. Місця вмикання діодів на схемі відмічені крапками. Кожному стовпцю цієї матриці відповідає один із виходів на двостабільний елемент. Функції виходу на схемі відповідає стовпець зі стрілкою і надписом y . А запис $\tilde{T}_1 \tilde{T}_2 \dots \tilde{T}_{10}$ означає кодову комбінацію станів, яка поступає на входи схеми співпадання з виходів двостабільних елементів. Змінна \tilde{T}_i , ($i = \overline{1,10}$) може приймати значення або T_i або $\overline{T_i}$.

5.2. Практична реалізація синтезованої структури

На другому етапі синтезу структури системи діагностування електричних двигунів по стану ізоляції обмоток здійснюємо перетворення отриманої структурної системи діагностування до зручного для реалізації в вибраній елементній базі вигляду. Для цього перетворимо схему, зображену на рис. 5.2, таким чином, щоб замінити з'єднання елементів через діодну матрицю безпосереднім під'єднанням. Отримана в результаті перетворень схема приведена на рис. 5.3.

Часові логічні функції τ_i ($i = \overline{1,12}$) на цьому рисунку замінені елементами витримки часу, які їх реалізують. Кон'юкції (диз'юнкції) в системі секвенцій (5.5) замінені відповідно елементами І (АБО).

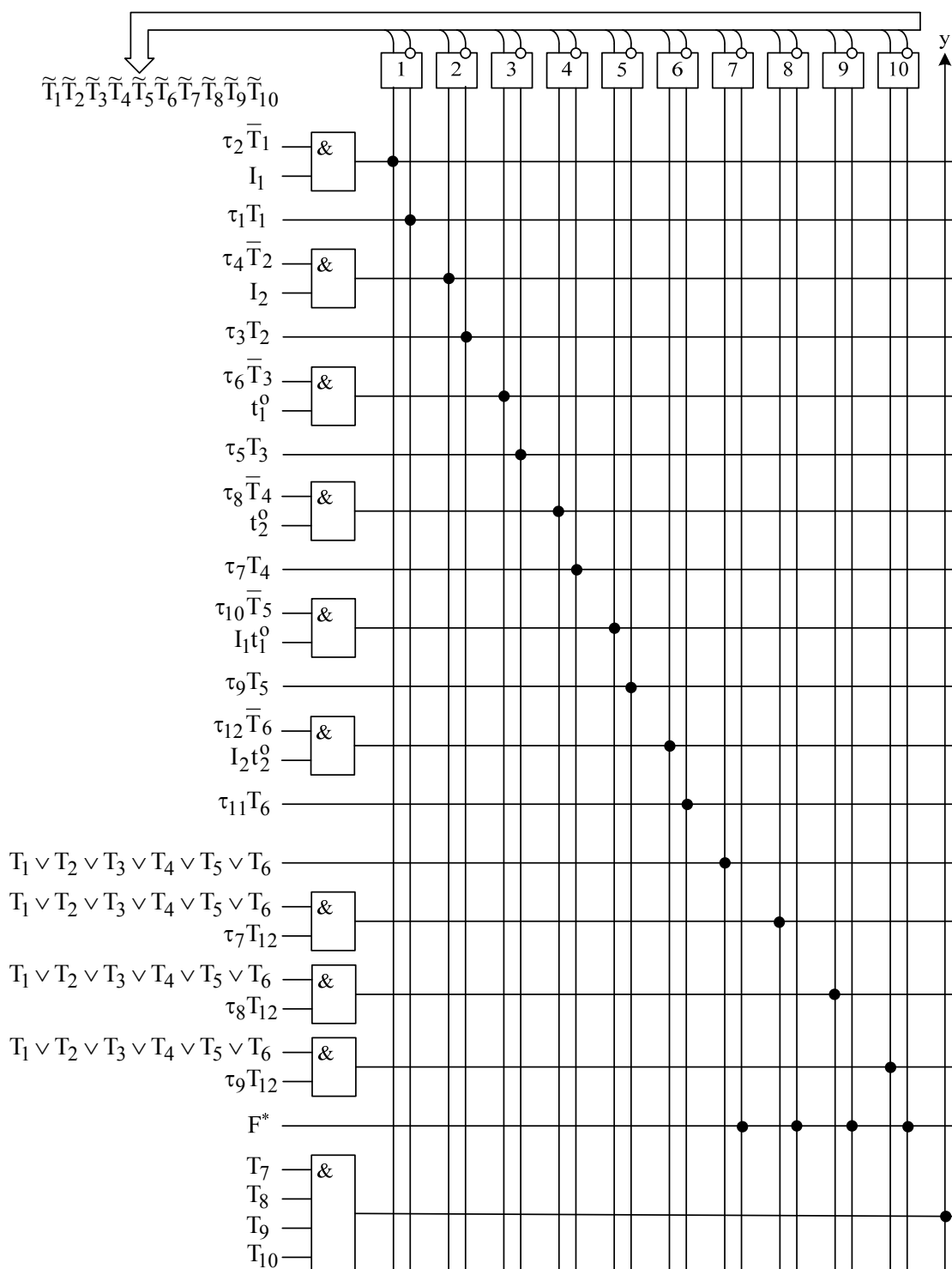


Рис. 5.2. Функціональна схема блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування електричного двигуна

Частина входів схеми співпадання двостабільних елементів, яка враховує зміни кодів стану T_1 – T_6 та часові логічні функції τ_i ($i = \overline{1, 12}$), реалізується у вигляді комбінації генератора імпульсів і двійкового

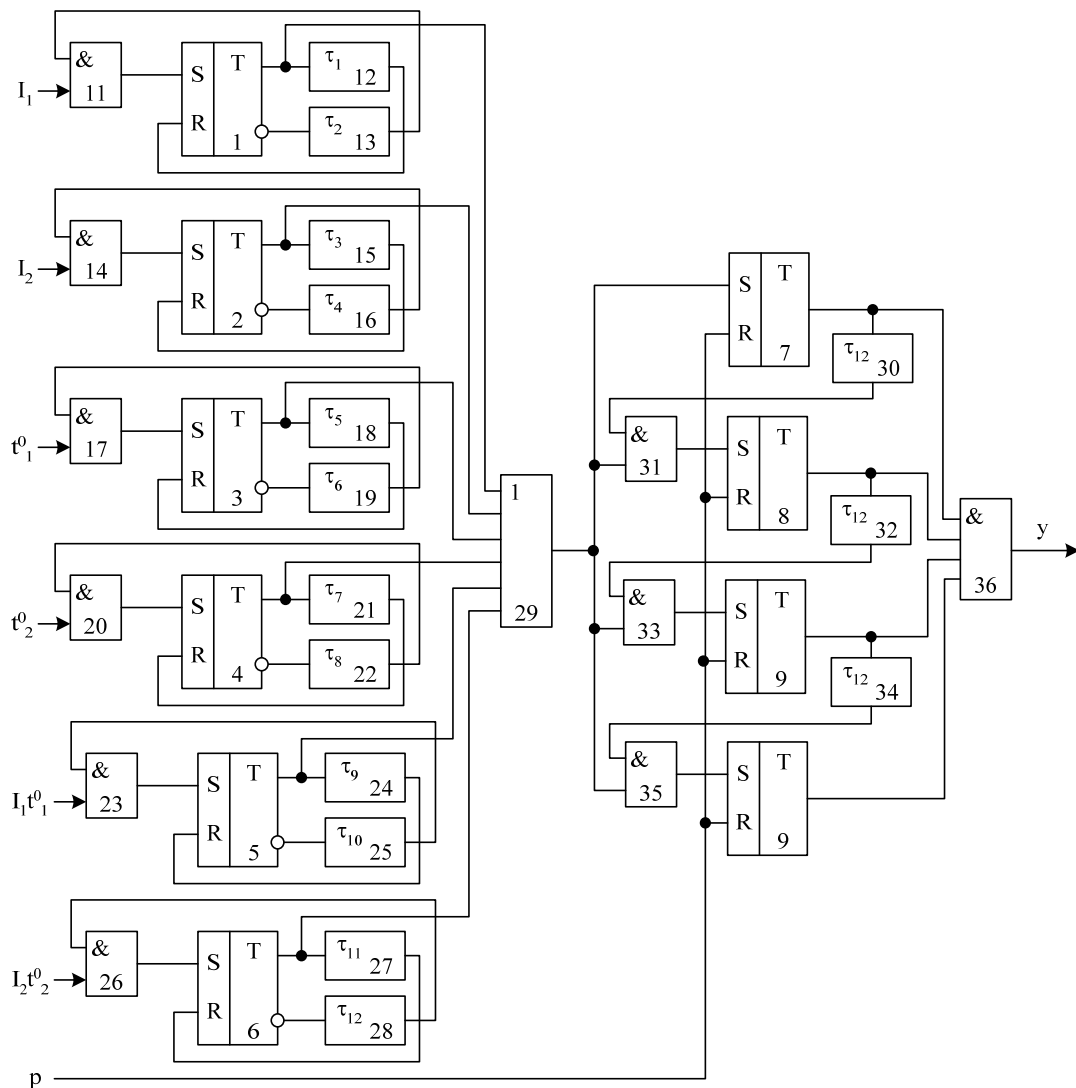


Рис. 5.3. Структурна схема блока обчислення залишкового ресурсу системи діагностування електричного двигуна по стану ізоляції

лічильника імпульсів, кожна частота на кожному виході якого відрізняється в два рази від попередньої.

Код стану F^* , за яким лічильники і тригери встановлюються в початковий стан, реалізується блоком установки нуля (БУН).

З врахуванням вказаних зауважень перетворимо схему рис. 5.3 до вигляду, зручного для реалізації з використанням елементів, які серійно випускаються.

Після перетворень отримаємо структурну схему діагностування електричного двигуна по стану ізоляції обмоток [117, 118], зображену на рис. 5.4.

Для контролю робочого ресурсу електричного двигуна сенсори пристрою розподілені по об'єкта контролю таким чином: СС 1 встановлюється в колі вмикання двигуна, а СТ 20 – у найбільш нагрітій точці двигуна.

Припускається, що в блоці ЗШЗТ 13 записане максимально допустиме значення швидкості зміни температури, а в блоці ЗР 26 в цифровому вигляді записане значення робочого ресурсу електричного двигуна.

У частині схеми, що містить блоки 1–10, здійснюється вимірювання значення струму, спожитого електродвигуном, і його перерахунок у виділене тепло з подальшим урахуванням його в зміні залишкового ресурсу двигуна.

Послідовності імпульсів з генератора імпульсів G 10 поступають на другий вхід першого логічного елемента І 7 і на вхід ДЧ 9, на виході якого з'являється кожен k-ий імпульс з тих, що на нього поступають. Число k підбирається таким чином, щоб узгодити роботу частин пристрою. Далі імпульси з виходу ДЧ 9 поступають на вхід першого РТ 6.

На першому такті вимірювання струму з першого виходу першого РТ 6 подається сигнал дозволу зчитування інформації з СС 1 на перший АЦП 2, де аналоговий сигнал перетворюється в цифровий код, який потім подається на вхід ФП 3. На виході ФП 3 формується цифровий код, який відповідає рівню відпрацьованого ресурсу двигуна по струму, який протікає в обмотках електричного двигуна.

На другому такті вимірювання струму з другого виходу першого РТ 6 подається сигнал дозволу зчитування інформації з ФП 3 на лічильний вхід першого лічильника імпульсів 4. Потім цифровий код з виходу першого лічильника імпульсів 4 через перший логічний елемент АБО 5 подається на третій вхід логічного елемента І 7.

На третьому такті вимірювання струму на третьому виході першого РТ 6 з'являється сигнал, який подається на перший вхід першого логічного елемента І 7. На виході останнього з'являється сигнал логічної одиниці, який одночасно подається на віднімаючий вхід першого лічильника імпульсів 4 і на перший вхід третього логічного елемента АБО 27. У випадку обнуління першого лічильника імпульсів 4, на виході першого логічного елемента І 7 присутній сигнал логічного нуля. З виходу третього логічного елемента АБО 27 сигнал поступає на віднімаючий вхід двійкового лічильника ресурсу 28. В двійковому лічильнику 28 від залишкового ресурсу двигуна віднімається відпрацьований ресурс, обумовлений старінням ізоляції обмоток. У випадку обнуління двійкового лічильника ресурсу 28, що свідчить про вичерпання ресурсу роботи двигуна, останній відключається від мережі сигналами.

лом, поданим із виходу логічного елемента АБО-НІ 29 через четвертий логічний елемент АБО 30 і підсилювач сигналу 31, або ж видається попереджувальний сигнал водію (в коло сигналізації).

У частині схеми, що містить блоки 11–25, здійснюється вимірювання значення температури і перетворення її у відповідне значення відпрацьованого ресурсу двигуном.

Послідовності імпульсів з генератора імпульсів G 25 поступають на другий вхід другого логічного елемента І 24 і на вхід другого РТ 23. З виходу СТ 20 сигнал, який відповідає температурі обмоток двигуна, поступає на другий вхід диференціального підсилювача 15, на перший вхід якого поступає сигнал з ПН 11, а на вхід останнього поступає сигнал з СС 1.

На першому такті вимірювання температури з першого виходу другого РТ 23 подається сигнал дозволу зчитування інформації з диференціального підсилювача 15 на другий АЦП 16, де аналоговий сигнал, що відповідає перевищенню температури електричного двигуна, яка подається від СТ 20, над температурою, викликану нагрівом при протіканні струму в обмотках, перетворюється в цифровий код.

На другому такті вимірювання температури цифровий код з виходу другого АЦП 16 записується в регістр RG 17 по сигналу, який надходить на лічильний вхід цього регістра з другого виходу другого РТ 23. Далі цифровий код з виходу регістра RG 17 поступає на перший вхід першого суматора 18, на другий вхід якого поступає також цифровий код із ЗК 12. Сумарний цифровий код з виходу першого суматора 18 надходить на перший вхід другого суматора 19, на другий вхід якого надходить цифровий код з виходу другого АЦП 16. На виході другого суматора 19 формується цифровий код, який відповідає швидкості зміни температури. У випадку перевищення швидкості зміни температури максимально допустимого значення, яке записане у цифровому коді в ЗШЗТ 13, то на виході цифрового компаратора 14 з'являється сигнал логічної одиниці, який через четвертий логічний елемент АБО 30 і підсилювач сигналу 31 подається на відключення двигуна від мережі (в коло сигналізації). В іншому випадку на виході цифрового компаратора 14 присутній сигнал логічного нуля.

На третьому такті вимірювання температури на третьому виході другого РТ 23 з'являється сигнал, який подається на лічильний вхід другого лічильника імпульсів 21. При цьому останньому надається дозвіл зчитування інформації з другого АЦП 16. Далі цифровий код з виходу другого лічильника імпульсів 21 через другий логічний елемент АБО 22 подається на третій вхід другого логічного елемента І 24. На виході останнього з'являється сигнал логічної одиниці, який одночасно подається на віднімаючий вхід другого лічильника імпульсів 21

і на другий вхід третього логічного елемента АБО 27. У випадку обнуління другого лічильника імпульсів 21, на виході другого логічного елемента І 24 присутній сигнал логічного нуля. В двійковому лічильнику 28 від залишкового ресурсу двигуна віднімається відпрацьований ресурс, обумовлений старінням ізоляції обмоток перевищенням температури.

5.3. Розробка питань вдосконалення системи технічної діагностики електричного двигуна

Запропонована система дозволяє контролювати ресурс двигуна тільки по стану ізоляції, а електричні двигуни, крім обмоток, мають інші вузли, які також необхідно діагностувати, щоб точніше визначити ресурс двигуна. Ці міркування наводять на думку об'єднати різні пристрої в одну централізовану систему діагностування, для реалізації якої необхідно використовувати мікропроцесорну техніку.

Структурна схема системи діагностування електродвигунів із застосуванням однокристальних мікро-ЕОМ (OEOM), наприклад KM1816BE51, приведена на рис. 5.5.

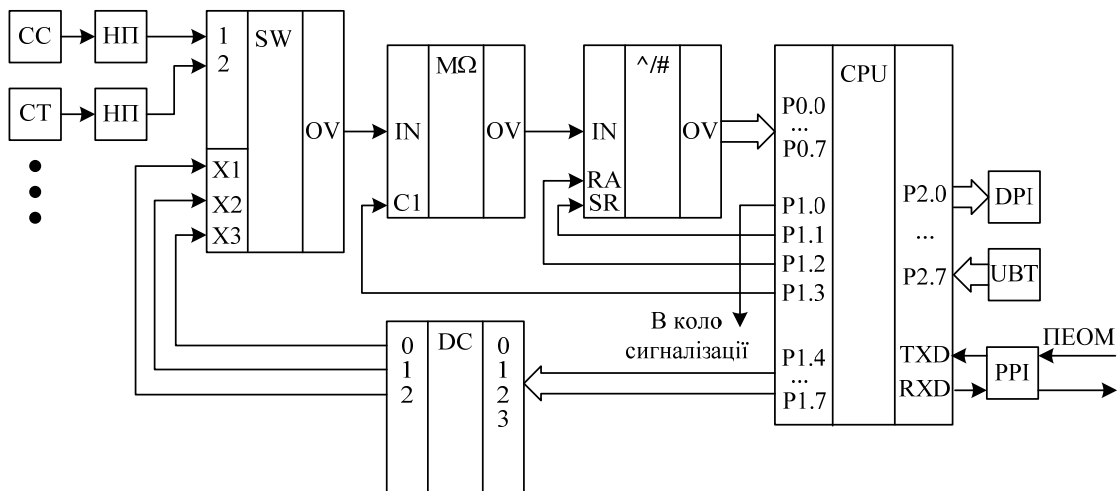


Рис. 5.5. Структурна схема системи діагностування електродвигуна з використанням OEOM KM1816BE51

Структурна схема містить: CC, CT, НП, аналоговий комутатор SW, аналогову пам'ять MΩ, АЦП, мікроконтролер CPU, дешифратор DC, цифрове табло DPY, клавіатуру UBT.

Сигнали з виходів сенсорів поступають на відповідні НП, в яких здійснюється перетворення вхідної величини в уніфіковані сигнали постійної напруги. Виходи НП під'єднуються до комутатора SW. Комутатор здійснює послідовне під'єднання аналогових сигналів, що

знімаються з різних каналів, до одного спільного вихідного каналу з розподілом часу. Управління під'єднанням i -го вхідного сигналу до виходу комутатора здійснюється з допомогою коду, що подається на цифровий керуючий вхід із виходів дешифратора DC, сигнали управління яким, в свою чергу, поступають по цифровій шині з портів P1.4 – P1.7 CPU.

ОЕОМ KM1816BE51 повинна приймати й обробляти аналогові сигнали, які поступають з сенсорів. Однак CPU приймає і обробляє тільки цифрові сигнали. Тому між комутатором і CPU повинен знаходитися АЦП для перетворення аналогових сигналів у цифрові. Вихідна десятирозрядна цифрова шина АЦП під'єднується до портів P0.0 – P0.7, вихід RA (готовність даних) - до порту P1.2, а вихід порту P1.1 CPU під'єднується до входу SR (гасіння й перетворення) АЦП. При подачі на вхід SR рівня логічного нуля АЦП починає перетворення вхідної інформації. Через час, необхідний для перетворення, на виході RA АЦП з'являється сигнал з рівнем логічної одиниці, що ініціює виведення даних з АЦП на цифрову шину до CPU. Приймавши дані, CPU встановлює на вході SR АЦП рівень логічної одиниці, який гасить інформацію, що міститься в регістрі послідовного наближення всередині АЦП, і АЦП знову готовий до прийому і обробки вхідних даних. Таким чином, CPU ініціює АЦП і через задані періоди дискретизації зчитує з нього цифровий код. Протягом часу перетворення сигналу в АЦП сигнали з сенсорів продовжують поступати до комутатора через НП. В зв'язку з цим необхідно додатково встановити пристрій вибірки-зберігання МΩ між комутатором і АЦП. МΩ забезпечує зберігання сигналу для виконання перетворення по одному каналу в той час, коли комутатор перемикається на інший канал. Відлік сигналу у відповідні моменти запам'ятовується в МΩ на час, необхідний для того, щоб АЦП перетворив його в двійковий код. Сигнал з комутатора поступає до інформаційного входу МΩ, вихід якого під'єднується до аналогового входу АЦП, а до керуючого входу МΩ під'єднується вихід порта P1.3 CPU.

ОЕОМ здійснює обробку даних, які поступають, по відповідній програмі, записаній в постійно запам'ятовуючому пристрої, і видає сигнал в коло сигналізації у випадку закінчення ресурсу двигуна. Обмін інформацією (передача і прийом) між CPU і центральним персональним комп'ютером (ПЕОМ), що знаходиться в диспетчерському пульті, здійснюється через порти TXD і RXD ОЕОМ і блок узгодження рівнів сигналів PPI. Якщо CPU, до прикладу, з'єднується з ПЕОМ по послідовному інтерфейсу RS-232, то узгодження рівнів може бути здійснено з допомогою буферних схем прийомо-передавачів K170АП2 і K170УП2.

Незадіяні порти CPU можуть бути використані при розширенні функціональних можливостей. Наприклад, до CPU можна під'єднати такі додаткові пристрої як клавіатуру UBT і цифрове табло DPI. UBT використовується при вводі оперативної інформації, а DPI показує залишковий ресурс електродвигуна.

Для зменшення кількості елементів схеми системи діагностування (рис. 5.5) OEOM KM1816BE51 можна замінити на більш компактнішу AT90S/LS8535. В такому мікроконтролері CPU АЦП, дешифратор DC, пристрій вибірки-зберігання МΩ і комутатор SW об'єднані в одній мікросхемі. При цьому структурна схема рис. 5.5 набуде вигляду, представленого на рис. 5.6.

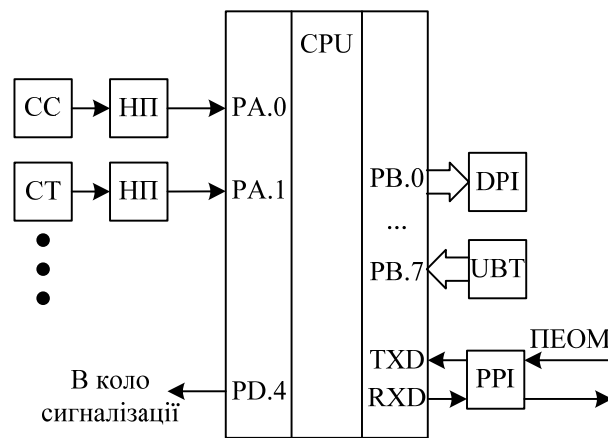


Рис. 5.6. Структурна схема системи діагностування електродвигуна з використанням OEOM AT90S/LS8535

5.4. Синтез структури системи технічної діагностики прискорювача трамвая

Згідно моделі (2.18) можна побудувати алгоритм функціонування системи діагностування прискорювача трамвая (рис. 5.7), яка визначає послідовність перевірки контактних пальців K_i та блок-контактів $Z_{i,j}$. На рис. 5.7 F – вхідний сигнал, який характеризує початок діагностування.

Стан, в якому може перебувати система, позначимо через S , а узгальнюючу вхідну змінну – через X . Символ «*» над прийнятими позначеннями означає, що даний параметр ще не ідентифіковано системою.

Для виконання процесу діагностування прискорювача системі необхідно виконати такі операції [119]:

- 1) визначити кут α_i ;
- 2) перевірити контактний палець K_i (замкнений/розімкнений);

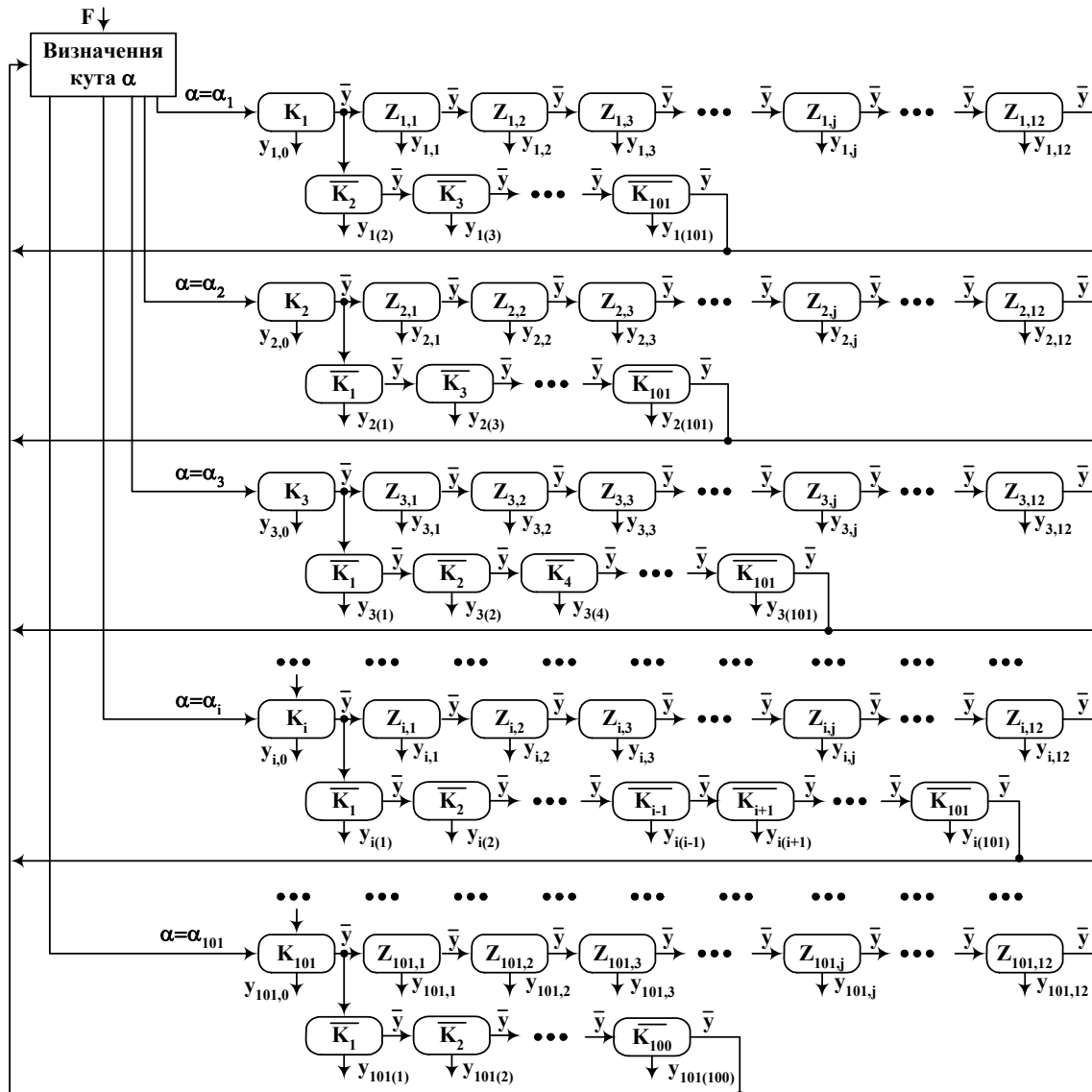


Рис. 5.7. Графічна інтерпретація алгоритму функціонування системи діагностування прискорювача трамвая

- 3) перевірити блок-контакти $Z_{i,j}$ на відповідність робочій діаграмі;
- 4) перевірити стани (замкнений/розімкнений) інших контактних пальців K_m .

Стани, в яких може перебувати система при діагностуванні прискорювача трамвая, можуть бути представлені у вигляді графа, наведеного на рис. 5.8.

Аналітично процес функціонування системи діагностування прискорювача трамвая, представлений у вигляді графа, наведеного на рис. 5.8, може бути описаний такою системою логічних рівнянь:

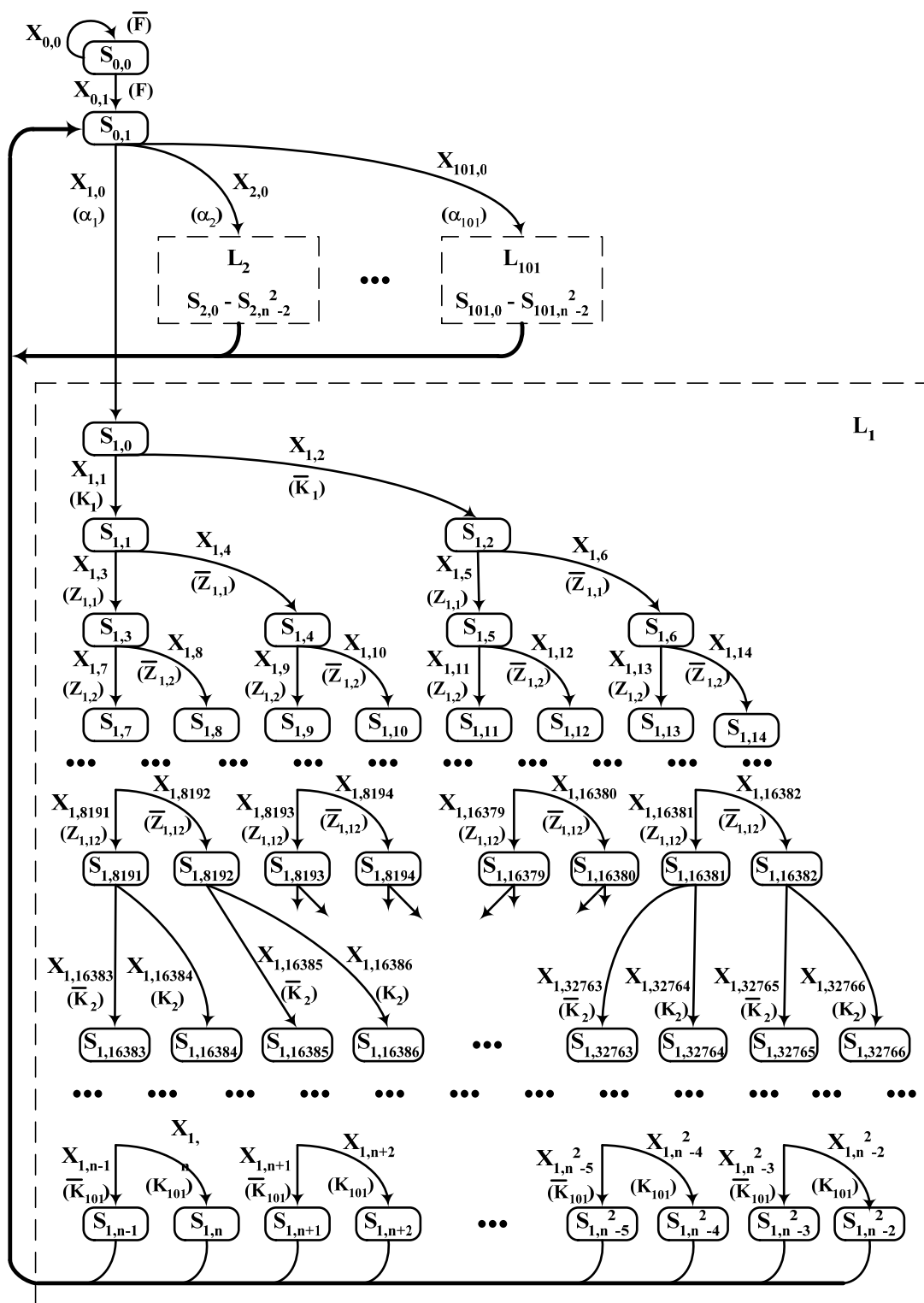


Рис. 5.8. Граф функціонування системи діагностування прискорювача трамвая

$$X_{0,0} = K_i Z_{i,j} \alpha \bar{F};$$

$$X_{0,1} = K_i Z_{i,j} \alpha F;$$

$$\begin{aligned}
X_{1,0} &= \overset{*}{K_i} \overset{*}{Z_{i,j}} \alpha_1; \\
X_{1,1} &= K_1 \overset{*}{Z_{i,j}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,2} &= \bar{K}_1 \overset{*}{Z_{i,j}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,3} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \overset{*}{Z_{1,2}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,4} &= K_1 \bar{Z}_{1,1} \overset{*}{Z_{1,2}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,5} &= \bar{K}_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \overset{*}{Z_{1,2}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,6} &= \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \overset{*}{Z_{1,2}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,7} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \overset{*}{Z_{1,2}} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,8} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \bar{Z}_{1,2} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,9} &= K_1 \bar{Z}_{1,1} \overset{*}{Z_{1,2}} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,10} &= K_1 \bar{Z}_{1,1} \bar{Z}_{1,2} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,11} &= \bar{K}_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \overset{*}{Z_{1,2}} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,12} &= \bar{K}_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \bar{Z}_{1,2} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,13} &= \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \overset{*}{Z_{1,2}} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,14} &= \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \bar{Z}_{1,2} \overset{*}{Z_{1,3}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
&\dots\dots\dots \\
X_{1,8191} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \dots \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,8192} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \dots \overset{*}{Z_{1,11}} \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1; \\
X_{1,8193} &= K_1 \overset{*}{Z_{1,1}} \dots \overset{*}{Z_{1,10}} \bar{Z}_{1,11} \overset{*}{Z_{1,12}} \overset{*}{K_2} \dots \overset{*}{K_{101}} \alpha_1;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& X_{1,8194} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,10} \bar{Z}_{1,11} \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{K}_2 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& \dots\dots\dots \\
& X_{1,16379} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,10} Z_{1,11} Z_{1,12} \overset{*}{K}_2 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16380} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,10} Z_{1,11} \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{K}_2 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16381} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,11} Z_{1,12} \overset{*}{K}_2 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16382} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{K}_2 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16383} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} \overset{*}{\bar{K}}_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16384} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} K_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16385} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,11} \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{\bar{K}}_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,16386} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,11} \bar{Z}_{1,12} K_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& \dots\dots\dots \\
& X_{1,32763} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,11} Z_{1,12} \overset{*}{\bar{K}}_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,32764} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,11} Z_{1,12} K_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,32765} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} \overset{*}{\bar{K}}_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,32766} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} K_2 \overset{*}{K}_3 \dots \overset{*}{K}_{101} \alpha_1; \\
& \dots\dots\dots \\
& X_{1,n-1} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} \bar{K}_2 \dots \bar{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,n} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} \bar{K}_2 \dots \bar{K}_{100} K_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,n+1} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} \bar{K}_2 \dots \bar{K}_{99} K_{100} \bar{K}_{101} \alpha_1; \\
& X_{1,n+2} = K_1 Z_{1,1} \dots Z_{1,12} \bar{K}_2 \dots \bar{K}_{99} K_{100} K_{101} \alpha_1; \\
& \dots\dots\dots
\end{aligned} \tag{5.6}$$

$$X_{1,n^2-5} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} K_2 \dots K_{99} \bar{K}_{100} \bar{K}_{101} \alpha_1;$$

$$X_{1,n^2-4} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} K_2 \dots K_{99} \bar{K}_{100} K_{101} \alpha_1;$$

$$X_{1,n^2-3} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} K_2 \dots K_{100} \bar{K}_{101} \alpha_1;$$

$$X_{1,n^2-2} = \bar{K}_1 \bar{Z}_{1,1} \dots \bar{Z}_{1,12} K_2 \dots K_{101} \alpha_1;$$

.....

$$X_{101,n^2-5} = \bar{K}_{101} \bar{Z}_{101,1} \dots \bar{Z}_{101,12} K_1 \dots K_{98} \bar{K}_{99} \bar{K}_{100} \alpha_{101};$$

$$X_{101,n^2-4} = \bar{K}_{101} \bar{Z}_{101,1} \dots \bar{Z}_{101,12} K_1 \dots K_{98} \bar{K}_{99} K_{100} \alpha_{101};$$

$$X_{101,n^2-3} = \bar{K}_{101} \bar{Z}_{101,1} \dots \bar{Z}_{101,12} K_1 \dots K_{99} \bar{K}_{100} \alpha_{101};$$

$$X_{101,n^2-2} = \bar{K}_{101} \bar{Z}_{101,1} \dots \bar{Z}_{101,12} K_1 \dots K_{100} \alpha_{101}$$

i

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{0,0} = y_{i,0} & y_{i,j} & y_{i(m)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{0,1} = y_{i,0} & y_{i,j} & y_{i(m)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,0} = y_{i,0} & y_{i,j} & y_{i(m)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,1} = \bar{y} & y_{i,j} & y_{1(2)} \dots y_{1(101)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,2} = y_{1,0} & y_{i,j} & y_{1(2)} \dots y_{1(101)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,3} = \bar{y} & y_{1,2} \dots y_{1,12} & y_{1(2)} \dots y_{1(101)}; \end{array}$$

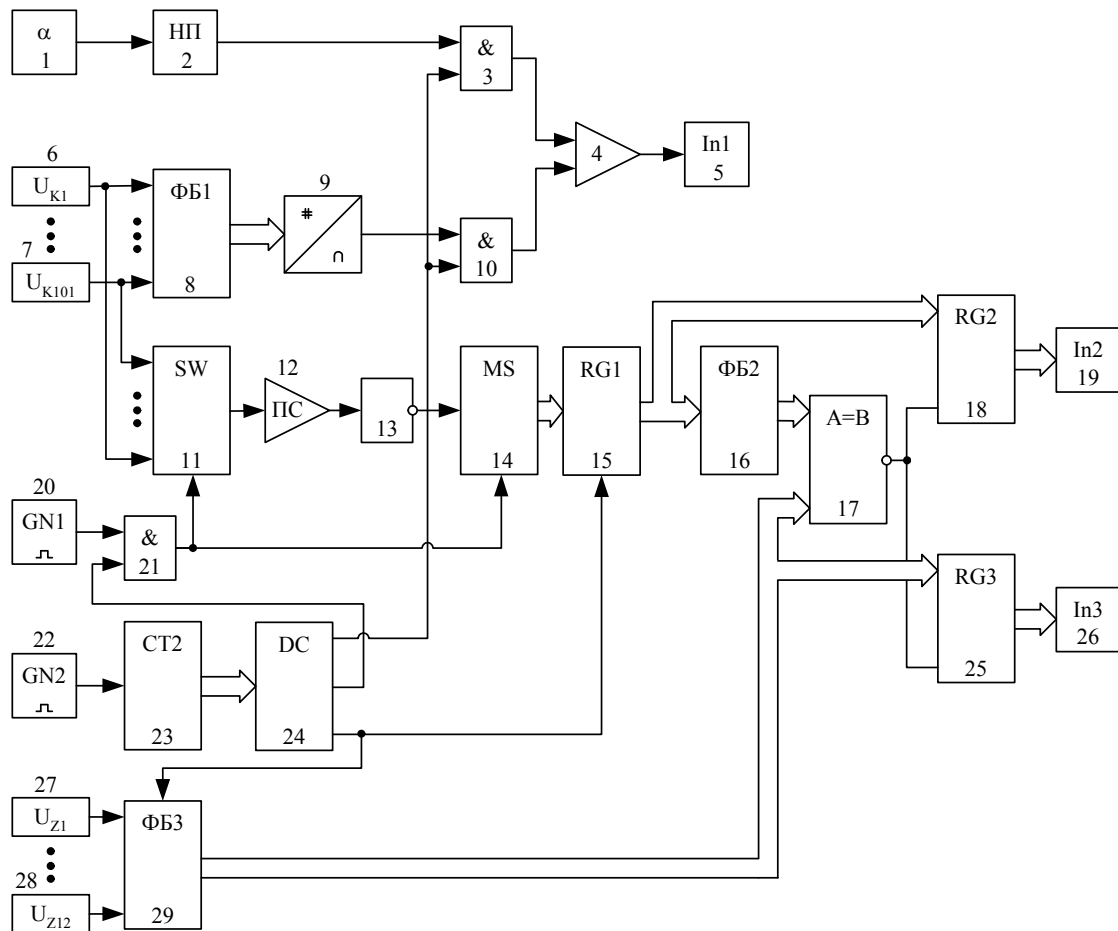
$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,4} = y_{1,1} & y_{1,2} \dots y_{1,12} & y_{1(2)} \dots y_{1(101)}; \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} * & * & * \\ S_{1,5} = y_{1,0} & y_{1,2} \dots y_{1,12} & y_{1(2)} \dots y_{1(101)}; \end{array}$$

$$\begin{aligned}
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,6} &= y_{1,0} y_{1,1} y_{1,2} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,7} &= \bar{y} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,8} &= y_{1,2} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,9} &= y_{1,1} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,10} &= y_{1,1} y_{1,2} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,11} &= y_{1,0} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,12} &= y_{1,0} y_{1,2} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,13} &= y_{1,0} y_{1,1} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & * & * \end{array} \\
S_{1,14} &= y_{1,0} y_{1,1} y_{1,2} y_{1,3} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \dots\dots\dots \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,8191} &= \bar{y} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,8192} &= y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,8193} &= y_{1,11} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,8194} &= y_{1,11} y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \dots\dots\dots \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,16379} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,10} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,16380} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,10} y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,16381} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,11} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
& \begin{array}{cccc} * & * & & \end{array} \\
S_{1,16382} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)};
\end{aligned} \tag{5.7}$$

$$\begin{aligned}
S_{1,16383} &= \overline{y} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,16384} &= y_{1(2)} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,16385} &= y_{1,12} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,16386} &= y_{1,12} y_{1(2)} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
&\dots\dots\dots \\
S_{1,32763} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,11} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,32764} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,11} y_{1(2)} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,32765} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,12} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
S_{1,32766} &= y_{1,0} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \overset{*}{y_{1(3)}} \cdots \overset{*}{y_{1(101)}}; \\
&\dots\dots\dots \\
S_{1,n-1} &= \overline{y}; \\
S_{1,n} &= y_{1(101)}; \\
S_{1,n+1} &= y_{1(100)}; \\
S_{1,n+2} &= y_{1(100)} y_{1(101)}; \\
&\dots\dots\dots \\
S_{1,n^2-5} &= y_{1(0)} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(99)}; \\
S_{1,n^2-4} &= y_{1(0)} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(99)} y_{1(101)}; \\
S_{1,n^2-3} &= y_{1(0)} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(100)}; \\
S_{1,n^2-2} &= y_{1(0)} y_{1,1} \cdots y_{1,12} y_{1(2)} \cdots y_{1(101)}; \\
&\dots\dots\dots \\
S_{101,n^2-5} &= y_{101(0)} y_{101,1} \cdots y_{101,12} y_{101(1)} \cdots y_{101(98)}; \\
S_{101,n^2-4} &= y_{101(0)} y_{101,1} \cdots y_{101,12} y_{101(1)} \cdots y_{101(98)} y_{101(100)}; \\
S_{101,n^2-3} &= y_{101(0)} y_{101,1} \cdots y_{101,12} y_{101(1)} \cdots y_{101(99)}; \\
S_{101,n^2-2} &= y_{101(0)} y_{101,1} \cdots y_{101,12} y_{101(1)} \cdots y_{101(100)}.
\end{aligned}$$

Структурна схема системи діагностування прискорювача, яка розроблена у відповідності з графом рис. 5.8 та системами логічних рівнянь (5.6) і (5.7), наведена на рис. 5.9 [119].



На схемі: 1 – сенсор кута повороту ізолюючого ролика; 2 – НП; 3, 10, 21 – логічні елементи І; 4 – компаратор; 5, 19, 26 – індикатори; 6, 7 – сенсори потенціалів на контактних пальцях; 8, 16, 29 – функціональні блоки; 9 – ЦАП; 11 – аналоговий комутатор; 12 – підсилювач сиг-

налу; 13 – логічний елемент НІ; 14 – мультиплексор; 15, 18, 25 – регістри; 17 – цифровий компаратор; 20, 22 – генератори імпульсів; 23 – лічильник імпульсів; 24 – дешифратор; 27, 28 – сенсори потенціалів на блок-контактах. Схеми цих елементів і принцип роботи та основні параметри наведені в роботах [1210-127].

Працює дана система таким чином.

При ввімкненні пристрою починає працювати генератор імпульсів GN2 22, який за допомогою лічильника імпульсів СТ2 23 і дешифратора DC 24 формує тактові сигнали. Також зчитується сигнал з сенсора 1 кута повороту ізолюючого ролика і на виході НП 2 з'являється сигнал, який відповідає заданому куту повороту. В цей же момент часу зчитуються сигнали і з сенсорів потенціалу на контактних пальцях 6, 7 (на схемі показано лише два сенсори, а в реальності їх 101) і подаються на ФБ1 8, на виході якого формується цифровий код, що характеризує стан (замкнений/розімкнений) контактних пальців. Якщо замкненим є лише один контактний палець, то на виході ФБ1 8 з'являється сигнал, який характеризує деякий кут φ , що відповідає замкненому контактному пальцю. При появі першого тактового сигналу з виходу дешифратора DC 24 відкриваються елементи І 3 і 10 і сигнали з виходу НП 2 (відповідає куту α) та ЦАП 9 (відповідає куту φ), проходячи логічні елементи І 3 й 10 відповідно надходять на вхід компаратора 4. Якщо вхідні сигнали компаратора 4 однакові за рівнем аналогового сигналу, то на його виході формується сигнал логічного нуля і на індикатор In1 5 сигнал не подається. В іншому випадку індикатор In1 сигналізує про те, що необхідний контактний палець розімкнений, або замкнені два чи більше контактних пальці.

На другому такті відкривається елемент І 21 і сигнали з генератора імпульсів GN1 20 по черзі перемикають кожен вхід комутатора SW 11 на його вихід. Також одночасно з цим ті ж сигнали по черзі перемикають вхід мультиплексора MS 14 на кожен з його виходів і посиляють сигнал дозволу на запис в регістр RG1 15. За час існування імпульсу з генератора імпульсів GN1 20 аналоговий сигнал з виходу комутатора SW 11 через підсилювач сигналу ПС 12 і елемент НІ 13 перетворюються в логічний сигнал 0 або 1, який через мультиплексор MS 14 подається на відповідний вхід регістра RG1 15. При зникненні імпульсу з генератора імпульсів GN1 20 виконується запис логічної одиниці у відповідну комірку регістра RG1 15. Цикл запису в регістр RG1 15 складає 101 імпульс. Наприкінці циклу запису в регістрі RG1 15 міститься цифровий код, який відповідає замкненому (логічна 1) та розімкненому (логічний 0) стану всіх контактних пальців. Цикл припиняється при зникненні другого тактового сигналу з дешифратора DC 24.

На третьому такті сигнали з сенсорів потенціалів на блок-контактах 27, 28 (на схемі показано лише два сенсори, а в реальності їх 12) поступають на ФБЗ 29, на виході якого формується цифровий код, що відповідає реальним станам кожного з блок-контактів, і записується в регістр RG3 25 та подається на один з входів цифрового компаратора 17. В цей же момент часу з регістра RG1 15 інформація записується в регістр RG2 18 і передається на ФБ2 16. В цьому блоці записана інформація у вигляді матриці про стани блок-контактів. На виході ФБ2 16 формується цифровий код про стани блок-контактів згідно вхідного сигналу (i, j), що відповідає замкненому контактному пальцю. В компараторі 17 відбувається порівняння вхідних цифрових кодів. Якщо цифрові коди ідентичні, то на виході цифрового компаратора 17 формується сигнал логічного нуля. За таких умов на входах індикаторів In2 19 і In3 26 сигнал не змінюється. В іншому випадку на виході цифрового компаратора 17 з'являється сигнал логічної 1. Відповідно індикатори In2 19 і In3 26 змінюють свій стан і вказують на замикання більше ніж одного контактного пальця та невідповідність замикання блок-контактів робочій діаграмі відповідно.

Співвідношення частот генераторів імпульсів GN1 20 і GN2 22 визначається як $f_{GN1}/f_{GN2} = 101$.

5.5. Висновки

1. На основі моделі, розробленої в другому розділі, синтезовано структуру системи технічної діагностики електричного двигуна, яка дозволяє оцінити його залишковий ресурс по стану ізоляції обмотки. Система враховує такі параметри двигуна як спожитий струм з мережі, температуру найбільш нагрітої точки та швидкість зміни температури.

2. Запропоновано варіанти реалізації системи технічної діагностики електродвигуна як з використанням логічних елементів, що випускаються серійно, так і з використанням однокристальних мікропроцесорів KM1816BE51 та AT90S/LS8535.

3. На основі логіко-математичної моделі, розробленої в другому розділі, синтезовано структуру системи технічної діагностики прискорювача трамвая. Система дозволяє оцінити стан контактних пальців та блок-контактів прискорювача в будь-який момент часу.

4. Синтезовані структури можна використовувати як безпосередньо у вагонах трамваїв, так і для стендових випробувань.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що існуючі математичні моделі та системи для оцінки технічного стану та відновлення функціональних систем засобів міського електротранспорту не в достатній мірі задовольняють потреби ТТУ, оскільки вони не враховують стохастичності процесів, які протікають в реальних умовах функціонування електротранспорту, фактору заміни відмовленого елемента системи новим або післяремонтним; імовірності відновлення ремонтним органом елементів, які вийшли з ладу.

2. Обґрунтовано математичну модель, яка дозволяє досліджувати зміни електричних і температурних параметрів обмотки якоря тягового електричного двигуна трамвая в залежності від температури обмотки додаткових полюсів, що дало можливість синтезувати структуру системи технічної діагностики тягового електричного двигуна по стану ізоляції обмотки якоря з використанням розробленої секвенційної моделі, яка враховує такі параметри, як струм, температуру та швидкість зміни температури.

3. Розроблені логіко-математичні моделі функціонування та оцінки технічного стану прискорювача трамвая, що дало можливість синтезувати структуру системи технічної діагностики прискорювача, яка дозволяє здійснити контроль його стану не лише при стендових випробуваннях, а й в реальному режимі роботи.

4. Побудовані емпіричні моделі споживання електроенергії вінницькими трамваями на маршрутах за годину та на 1 км пробігу (в умовах м. Вінниці), за допомогою яких доведено, що споживання електроенергії трамваями апроксимується логарифмічним нормальним законом розподілу, що дозволило синтезувати математичні моделі прогнозу споживання електроенергії трамваями на маршрутах з використанням авторегресійних моделей. Отримані математичні моделі враховують стохастичність споживання електроенергії трамваями та сезонність їх роботи, а також рівень кваліфікації водіїв.

5. Запропоновано новий підхід до синтезу математичних моделей оцінок характеристик працездатності функціональних систем трамваїв з використанням авторегресійних залежностей, на основі якого розроблено метод синтезу моделей імовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов, який дозволяє врахувати заміни елементів, що вийшли з ладу в системах, та зміни умов їх функціонування. На основі запропонованого підходу розраховано числові значення характеристик працездатності основних функціональних систем трамваїв.

6. Узагальнено метод розрахунку обсягу запасних комплектів основних функціональних систем трамваїв шляхом введення в розраху-

нкові формули залежності від імовірності відновлення відмовлених систем, в якому враховано імовірність відновлення ремонтною службою елементів, що вийшли з ладу. На основі узагальненого методу визначено оптимальні кількості запасних комплектів для основних функціональних систем міських трамваїв.

Математичні моделі та системи діагностування розроблені для умов роботи трамваїв у Вінницькому ТТУ, але легко адаптуються і до умов роботи трамваїв в ТТУ інших міст України.

ЛІТЕРАТУРА

1. Статистичний збірник „Транспорт Вінниччини” / Вінницьке обласне управління статистики: під загальним керівництвом А.Ю. Храновського. – Вінниця, 2002. – 61 с.
2. Коган Л.Я., Корягина Е.Е., Белостоцкий И.А. Эксплуатация и ремонт троллейбусов. – М.: Транспорт, 1978. – 248 с.
3. Ефремов И.С., Кобозев В.М., Шевченко В.В. Технические средства городского электрического транспорта: Учеб. пособие для студ. вузов спец. «Гор. электр. транспорт». – М.: Высш. шк., 1985. – 448 с.
4. Веклич В.Д. Диагностирование технического состояния троллейбусов. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
5. Мокін Б. І., Бурденюк С. І., Гурильова Н. В. Проблеми та перспективи експлуатації засобів міського електротранспорту в функції їх стану // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2000. – №6. – С.22–25.
6. Бурденюк С.І. Дослідження характеристик працездатності складових систем засобів міського електротранспорту: Дис. магістра електромеханіки. – Вінниця: Вінницький державний технічний університет, 2000. – 153 с.
7. Мокін Б.І., Бурденюк С.І., Гурильова Н.В. Математичні моделі емпіричних законів розподілу несправностей функціональних систем трамваїв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 1. – С. 13–20.
8. Розводюк М.П. Математичні моделі та системи для діагностування засобів міського електротранспорту: Дис. магістра електромеханіки. – Вінниця: Вінницький державний технічний університет, 2001. – 135 с.
9. Соколов М.М. Диагностирование вагонов. – М.: Транспорт, 1990. – 197 с.
10. Чумаков Л.Д., Голубцов И.А., Зверева Л.Г. Оценка показателей надежности технических систем с использованием имитационного моделирования / Надежность технических систем: Сб. научн. тр. АН Украины. Ин-т техн. механики. Редкол.: Переверзев Е.С. (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1991. – С. 38–43.
11. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: “Мир”, 1984. – 318 с.
12. Костенко Н.А. Прогнозирование надежности транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
13. Калмуцкий В.С. Прогнозирование ресурса деталей машин и элементов конструкций. – Кишинев, «Штиица», 1989. – 160 с.

14. Дубіненко С.Б., Штовба С.Д. Основи теорії надійності систем управління і автоматики. Навч. посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 65 с.
15. Левин Б.Р. Теория надежности радиотехнических систем (математические подходы): Учебное пособие для вузов. – М.: «Сов. радио», 1978. – 264 с.
16. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Под. ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. – Т.2: Математические методы в теории надежности и эффективности. – 280 с.
17. Дмитриенко И.Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики. – М.: Транспорт, 1986. – 144 с.
18. Андриевский В.Н. Ремонтно-восстановительные работы в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
19. Калугин М.В. Устройство для диагностирования контактной сети троллейбуса / Наука и техника в городском хозяйстве. Респ. межвед. науч.-техн. сборник. Выпуск 54. - Городской электротранспорт. – К.: “Будівельник”, 1983. – С 46-49.
20. Андреев Л.Е., Снетков А.Ю. Тепловизионное обследование маслонаполненных вводов // Энергетик. – 1999. – № 9. – С. 35.
21. Вихров В.И. Опыт тепловизионного контроля ВЛ и трансформаторных подстанций // Энергетик. – 1992. – № 8. – С. 14.
22. Власов А.Б., Власова С.В., Джура А.В. Общие методики тепловизионного контроля // Наука – производству. – 2000. – № 2. – С. 22-25.
23. Карманов С.В. Тепловизионный контроль электрооборудования // Энергетик. – 1999. – № 11. – С. 38.
24. Ключко В.Л., Сорокин А.Ю., Тисленко В.В. Тепловизионная диагностика дефектов элементов воздушных линий электропередач // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 7. – С. 20-23.
25. Малов А.В., Снетков А.Ю. Тепловизионные обследование силовых трансформаторов // Энергетик. – 2000. – № 2. – С. 34-35.
26. Поляков В.С. Из опыта тепловизионной диагностики высоковольтного оборудования энергосистем // Энергетик. – 2000. – № 5. – С. 46.
27. Сапрыкин В.З. Опыт тепловизионного контроля трансформаторных подстанций // Энергетик. – 1993. – № 3. – С. 17-18.
28. Фрунзе А.В. Дистанционный измеритель температуры ДИЭЛТЕСТ-ТЭ/200 // Энергетик. – 1996. – № 4. – С. 12-14.
29. Озерицкий И.М., Иванов О.Е. Новые решения в тепловизионных системах диагностики промышленного оборудования // Энерге-

- тик. – 2000. – № 4. – С. 45.
30. Бард Г.С., Павлов Г.Л. О сферах применения и эффективности инфракрасных диагностических системах АГЕМА в энергетике // Энергетик. – 1999. – № 2. – С. 36-37.
 31. Чередеев Д.А. Об оптимальном спектральном диапазоне тепловизионного контроля // Энергетик. – 1999. – № 5. – С. 28-29.
 32. Курінний Е.Г., Верьовкін В.М., Вальков М.Г. Тепловізор. Діагностика електроустаткування на промислових підприємствах // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 2. – С. 43-46.
 33. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // Електроінформ. – 2002. – №1. – С. 14-16.
 34. Железнодорожная автоматика за рубежом / П.И. Куммер, А.Г. Ковалев, Т.В. Коптева, Г.А. Аветикян. – М.: Транспорт, 1985. – 191 с.
 35. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надежность автоматизированных систем управления технологическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 264 с.
 36. Ефимов В.В., Наумов В.А., Чурсин А.А. Теория и практические вопросы работоспособности элементов машин, приборов и аппаратуры. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984. – 220 с.
 37. Горелик В.А., Ушаков И.О. Исследование операций. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.
 38. Рыжиков Ю.И. Управление запасами, – М.: Наука, 1969. – 364 с.
 39. Рубальский Г.Б. Управление запасами при случайном спросе. – М.: Советское радио, 1977. – 160 с.
 40. Мокін Б.І., Ротштейн А.П., Острий І.Ф. Управління запасами на основі нечіткої логіки // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 12-19.
 41. Демченко С.С. Об одной модели управления запасами // Проблемы управления и информатики. – 2000. – №1. – С. 146-149.
 42. Барлоу Р., Прощан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 328 с.
 43. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 280 с.
 44. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. – М.: “Высшая школа”, 1977. – 160 с.
 45. Рипс А.Я., Савельев Б.А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами. – М.: “Энергия”, 1974. – 248 с.
 46. Щетина В.А., Лукинский В.С., Сергеев В.И. Снабжение запасны-

- ми частями на автомобільному транспорті. – М.: Транспорт, 1988. – 112 с.
47. Шевченко А.И., Синев К.Е. Особенности охлаждения якоря тяговых электродвигателей постоянного тока // Вісник Кременчуцького державного технічного університету. Випуск 1/2002 (12). – С. 233-235.
 48. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока. – М.: «ВШ», 1988. – 336 с.
 49. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 264 с.
 50. Кулаковский В.Б. Работа изоляции в генераторах: Возникновение и методы выявления дефектов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 256 с.
 51. Боляев И.П. Расчеты тепловых процессов в электрических машинах на электронной модели // Известия вузов СССР. Электромеханика – 1961 г. – №8. – С. 24-29.
 52. Васильев Ю.К., Богаенко И.Н. Экспериментальное исследование нагревания и вентиляции тягового двигателя магистральных электропоездов // Электричество. – 1964 г. – №2. – С. 18-23.
 53. Богаенко И.Н. Контроль температуры электрических машин. – К.: «Техніка», 1975. – 176 с.
 54. Черный А.П., Артеменко А. Особенности нагревания и охлаждения проводников обмоток электрических двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Випуск 1/2002 (12). – С. 205-207.
 55. Техническое описание трамвайного вагона типа КТ4СУ. – Praha: SKD PRAHA, 1988. – 468 с.
 56. Иванов М.Д., Алпаткин А.П., Иеропольский Б.К. Устройство и эксплуатация трамвая – М.: „Высшая школа”, 1975. – 291 с.
 57. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математична модель функціонування прискорювача трамвая // Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2003). – Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”, 2003. – С. 140.
 58. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математична модель функціонування прискорювача трамвая // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №6. – С.72-76.
 59. Далека В.Х. Методологічні аспекти ресурсозбереження на міському електричному транспорті. // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 49. – К.: “Техніка”, 2003. – С. 179–184.
 60. Будниченко В.Б., Далека В.Х., Карпушин Е.І., Хворост М.В. Планування потреби в електроенергії на експлуатацію міського електротранспорту за узагальненими статистичними даними // Ком-

- мунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып. 30. – К.: “Техніка”, 2001. – С. 249–254.
61. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі емпіричних законів розподілу споживання електроенергії трамваями // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 42-46.
 62. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі споживання електроенергії трамваями // Коммунальное хозяйство городов (Харьковская государственная академия городского хозяйства): Науч.-техн. сб. Вып. 49. – К.: “Техніка”, 2003. – С. 184–189.
 63. Колде Я. К. Практикум по теории вероятностей и математической статистике. – М.: “Высшая школа”, 1991. – 157 с.
 64. Микулин Н.А., Рейзина Г.И. Решение технических задач по теории вероятностей и математической статистике: Справочное пособие. – Мн.: Выш. шк., 1991. – 164 с.
 65. Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування: Навч. посібник. – К.: КНЕУ, 2001. – 170 с.
 66. Леман Э. Теория точечного оценивания. Теория вероятностей и математическая статистика: Пер. с англ. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 448 с.
 67. Статистична обробка даних / В.П. Бабак, А.Я. Білецький, О.П. Приставка, П.О. Приставка. – К.: „МІВВІЦ”, 2001. – 388 с.
 68. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
 69. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для экон. спец. вузов / Под ред. В.А. Колемаева. – М.: Высш. шк., 1991 – 400 с.
 70. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. – М.: ИЛ, 1960. – 280 с.
 71. Михок Г., Урсяну В. Выборочный метод и статистическое оценивание / Пер. с рум. В.М. Остану; Под ред. В.Ф. Матвеева. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 245 с.
 72. Уиттл П. Вероятность / Пер. с англ.; Под ред. В.В. Сазонова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1982. – 288 с.
 73. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 780 с.
 74. Коваленко И.Н., Филиппова А.А. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.
 75. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 495 с.

76. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 564 с.
77. Фрумкин В.Д., Рубичев Н.А. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
78. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. – М.: Металлургия, 1968. – 227 с.
79. Долинский Е.Ф. Обработка результатов измерений. – 2-е изд. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 191 с.
80. Рушминский Л.З. Математическая обработка результатов измерений: Справ. руководство. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
81. Яношин Л. Теория и практика обработки результатов измерений / Пер. с англ. – М.: Мир, 1965. – 462 с.
82. Математическая статистика / Под ред. А.М. Дина. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
83. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. – М.: Мир, 1976. – 755 с.
84. Смирнов И.В., Дунин-Барковский И.В. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 511 с.
85. Кенделл М. Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
86. Бриллинджер Д. Временные ряды. Обработка данных и теория. – М.: Мир, 1980. – 536 с.
87. Боровков А.А. Математическая статистика. Дополнительные главы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1984. – 144 с.
88. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука. Главная ред. физ.-мат. лит., 1982. – 256 с.
89. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.
90. Бессонов А.А. Прогнозирование характеристик надежности автоматических систем. – Л.: «Энергия», 1971. – 152 с.
91. Мацак І.К. Асимптотична поведінка норми максимуму послідовності нормальних випадкових величин // Теорія ймовірностей та математична статистика. – 1997. – Випуск 56. – С. 126-132.
92. Пушкарев И.Ф., Пахомов Э.А. Контроль и оценка технического состояния тепловозов. – М.: Транспорт, 1985. – 160 с.
93. Биргер И.А., Техническая диагностика. – М.: «Машиностроение», 1978. – 240 с.
94. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Вып. 1. – М.: «Мир», 1974. – 408 с.
95. Гурский С.К. Адаптивное прогнозирование временных рядов в

- електроенергетике. – Мн.: Наука и техника, 1983. – 271 с.
96. Быков В.М., Глебов И.А. Научные основы анализа и прогнозирования надежности генераторов. – Л.: Наука, 1984. – 214 с.
97. Мокін Б.І., Мокін В.Б. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів. Частина II. Ідентифікація ЕМП в лінійних стохастичних системах із зосередженими параметрами. – Вінниця: “УНІВЕРСУМ-Вінниця”, 1999. – 98 с.
98. Рабочая книга по прогнозированию / Редкол.: И.В. Бестужев-Лада (отв. ред.). – М.: Мысль, 1982. – 430 с.
99. Альберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. – М.: Наука, 1977. – 223 с.
100. Кольдишев Г.С., Френкель А.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. – М.: Статистика, 1973. – 102 с.
101. Дудко В.Б., Мокін Б.І., Розводюк М.П. Математичні моделі прогнозу споживання електроенергії трамваями на маршрутах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 6. – С. 38–44.
102. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Моделі оцінок роботоздатності функціональних систем трамваїв // Тези доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2001). – Вінниця: „УНІВЕРСУМ – Вінниця”, 2001. – С. 218.
103. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Моделі оцінок роботоздатності функціональних систем трамваїв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – №6. – С. 92–98.
104. Розводюк М.П. Математичні моделі для визначення резервів запасних частин основних функціональних систем трамваїв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 1. – С. 25–28.
105. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Новий підхід до розрахунку запасних комплектів основних функціональних систем трамваїв // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – №2. – С. 55–59.
106. Нормы времени и расценки на работы по ремонту трамваев вагонов Т4-СУ и КТ4-СУ в трамвайном депо Винницкого трамвайно-троллейбусного управления. – Винница: Винницкое ТТУ, 1996. – 68 с.
107. Устройство для контроля работы машин: А. с. 498635 СССР, МКИ G 07 C 3/10 / В.И. Морозов, Г.И. Солод, В.Н. Правоторов, А.И. Зворыгин (СССР). – №2028959/18-24; Заявлено 03.06.74; Оpubл. 05.01.76, Бюл. №1. – 2 с.
108. Устройство для определения ресурса машин: А. с. 720444 СССР, МКИ G 07 C 3/10 / А.Е. Лифшиц, А.М. Тарасов, В.Ф. Грибов,

- Г.И. Солод, Ю.Д. Красников (СССР). – №2529006/18-24; Заявлено 30.09.77; Оpubл. 05.03.80, Бюл. №9. – 4 с.
109. Счетчик износа изоляции: А. с. 655976 СССР, МКИ G 01 R 11/32 / В.В. Овчаров (СССР). – №2024488/18-21; Заявлено 15.05.74; Оpubл. 05.04.79, Бюл. №13. – 2 с.
 110. Устройство для контроля работы машин: А. с. 980111 СССР, МКИ G 07 C 3/10 / А.В. Рассказчиков, В.А. Савельев, В.Н. Шостаков, А.А. Чижов (СССР). – №3293486/18-24; Заявлено 03.06.81; Оpubл. 07.12.82, Бюл. №45. – 3 с.
 111. Устройство для контроля работы машин: А. с. 1348877 СССР, МКИ G 07 C 3/10 / А.А. Михайлов (СССР) – №4034677/24-24; Заявлено 10.03.86; Оpubл. 30.10.87, Бюл. №40. – 2 с.
 112. Устройство для контроля работы двигателя: А. с. 1541642 СССР, МКИ G 07 C 3/10 / М.Г. Тер-Мартirosян, И.С. Абян, В.Т. Оганесян, А.В. Акопян (СССР). – №4432499/24-24; Заявлено 17.03.88; Оpubл. 07.02.90, Бюл. №5. – 3 с.
 113. Захаров В.Н. Автоматы с распределенной памятью. – М.: "Энергия", 1975. – 136 с.
 114. Мокин Б.И., Грабко В.В., Динь Тхань Вьет. Математические модели и информационно-измерительные системы для технической диагностики трансформаторных вводов. – Винница: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 1997. – 130 с.
 115. Грабко В.В., Мокін Б.І. Моделі та системи технічної діагностики високовольтних вимикачів. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999, – 74 с.
 116. Грабко В.В., Боцула М.П. Методи та інформаційно-вимірювальні системи для технічної діагностики силових косинусних конденсаторів. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 144 с.
 117. Грабко В.В., Блінкін Є.Я., Розводюк М.П. Синтез структуры ИВС для діагностування електродвигунів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2000. – №4. – С. 111–115.
 118. Пристрій для контролю робочого ресурсу електричного двигуна: Пат. Україна, МПК 7 G07C3/10 / Б.І. Мокін, В.В. Грабко, М.П. Розводюк. – №70887 А; Заявлено 31.12.2003; Оpubл. 15.10.2004, Бюл. №10. – 6 с.
 119. Мокін Б.І., Розводюк М.П. Синтез структуры системы для діагностування прискорювача трамвая // Вісник ВПІ. – 2004. – №1. – С. 41–45.
 120. Иванов М.Д., Алпаткин А.П., Иеропольский Б.К. Устройство и эксплуатация трамвая. – М.: „Высшая школа”, 1975. – 291 с.
 121. Шило В.Л. Популярные цифровые микросхемы: Справочник. –

- М.: Радио и связь, 1987. – 352 с.
122. Применение интегральных микросхем в электронной вычислительной технике: Справочник / Р.В. Данилов, С.А. Ельцова, Ю.П. Иванов и др.; Под ред. Б.Н. Файзулаева, Б.В. Тарабрина. – М.: Радио и связь, 1987. – 384 с.
123. Справочник по интегральным микросхемам / Под общ. ред. Б.В. Тарабрина – М.: Энергия, 1977.
124. Костинюк Л.Д., Паранчук Я.С. Мікропроцесорні засоби та системи: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2001. – 200 с.
125. Интегральные микросхемы: Микросхемы для аналого-цифрового преобразования и средств мультимедиа. Выпуск №2. – М.: ДОДЭКА, 1996. – 384 с.
126. Федорков Б.Г., Телец В.А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
127. Гитис Э.И., Пискунов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. Моделі оцінок характеристик працездатності основних функціональних систем трамваїв

Таблиця А.1

Оцінка характеристики працездатності ГС трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(ГС, Т)}$	{15, 18, 9, 17, 19, 19, 15, 12, 13, 10, 10, 14}
$R^{(ГС, Т)}$	{0,86726; 0,84071; 0,92035; 0,84956; 0,83186; 0,83186; 0,86726; 0,89381; 0,88496; 0,9115; 0,9115; 0,87611}
$\mu_R^{-(ГС, Т)}$	0,87389
$\wedge_R^{(ГС, Т)}$	{- 0,00664; - 0,03319; 0,04646; - 0,02434; - 0,04204; - 0,04204; - 0,00664; 0,01991; 0,01106; 0,03761; 0,03761; 0,00221}
$\gamma_R^{-(ГС, Т)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(ГС, Т)} = 9,0225 \cdot 10^{-4}$; $\gamma_{R(1)}^{-(ГС, Т)} = 2,38059 \cdot 10^{-4}$; $\gamma_{R(2)}^{-(ГС, Т)} = 1,85997 \cdot 10^{-5}$
$\rho_R^{-(ГС, Т)}$	$\rho_{R(0)}^{-(ГС, Т)} = 1,0$; $\rho_{R(1)}^{-(ГС, Т)} = 0,26385$; $\rho_{R(2)}^{-(ГС, Т)} = 0,02061$
D_a	$8,36129 \cdot 10^{-4}$
$R_k^{(ГС, Т)}$	0,90088
$\lambda_k^{(Г, Т)}$	0,105

Таблиця А.2

Оцінка характеристики працездатності ТД трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(ТД, Т)}$	{9, 12, 10, 9, 14, 7, 9, 9, 3, 6, 5, 7}
$R^{(ТД, Т)}$	{0,92035; 0,89381; 0,9115; 0,92035; 0,87611; 0,93805; 0,92035; 0,92035; 0,97345; 0,9469; 0,95575; 0,93805}
$\mu_R^{-(ТД, Т)}$	0,92625

Продовження табл. А2

Параметр	Числове значення
$\hat{R}^{(ТД, Т)}$	$\{-0,0059; -0,03245; -0,01475; -0,0059;$ $-0,005015; -0,0118; -0,0059; -0,0059;$ $0,0472; 0,02065; 0,00295; 0,0118\}$
$\gamma_R^{-(ТД, Т)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(ТД, Т)} = 6,43921 \cdot 10^{-4}; \quad \gamma_{R(1)}^{-(ТД, Т)} = 1,89063 \cdot 10^{-4};$ $\gamma_{R(2)}^{-(ТД, Т)} = 2,41035 \cdot 10^{-4}$
$\rho_R^{-(ТД, Т)}$	$\rho_{R(0)}^{-(ТД, Т)} = 1,0;$ $\rho_{R(1)}^{-(ТД, Т)} = 0,29361; \quad \rho_{R(2)}^{-(ТД, Т)} = 0,37432$
D_a	$6,05911 \cdot 10^{-4}$
$R_k^{(ТД, Т)}$	0,96288
$\lambda_k^{(ТД, Т)}$	0,03783

Таблиця А.3

Оцінка характеристики працездатності РКС трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(РКС, Т)}$	$\{61, 53, 60, 104, 72, 58, 69, 35, 38, 53, 43, 48\}$
$R^{(РКС, Т)}$	$\{0,46018; 0,53097; 0,46903; 0,07965; 0,36283; 0,48673;$ $0,38938; 0,69027; 0,66372; 0,53097; 0,61947; 0,57522\}$
$\mu_R^{-(РКС, Т)}$	0,4882
$\hat{R}^{(РКС, Т)}$	$\{-0,02802; 0,04277; -0,01917; -0,40855;$ $-0,12537; -0,00147; -0,09882; 0,20206;$ $0,17552; 0,04277; 0,13127; 0,08702\}$
$\gamma_R^{-(РКС, Т)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(РКС, Т)} = 0,02447; \quad \gamma_{R(1)}^{-(РКС, Т)} = 8,85529 \cdot 10^{-3};$ $\gamma_{R(2)}^{-(РКС, Т)} = 1,62198 \cdot 10^{-3}$
$\rho_R^{-(РКС, Т)}$	$\rho_{R(0)}^{-(РКС, Т)} = 1,0;$ $\rho_{R(1)}^{-(РКС, Т)} = 0,36187; \quad \rho_{R(2)}^{-(РКС, Т)} = 0,06628$
D_a	0,02103

Продовження табл. А3

Параметр	Числове значення
$R_k^{(PKC, T)}$	0,67653
$\lambda_k^{(PKC, T)}$	0,39078

Таблиця А.4

Оцінка характеристики працездатності П трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(П, T)}$	{62, 35, 50, 73, 66, 74, 53, 36, 32, 53, 36, 59}
$R^{(П, T)}$	{0,45133; 0,69027; 0,55752; 0,35398; 0,41593; 0,34513; 0,53097; 0,68142; 0,71681; 0,53097; 0,68142; 0,47788}
$\mu_R^{-(П, T)}$	0,53614
$\hat{R}^{(П, T)}$	{-0,08481; 0,15413; 0,02139; -0,18215; -0,12021; -0,191; -0,00516; 0,14528; 0,18068; -0,00516; 0,14528; -0,05826}
$\gamma_R^{-(П, T)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(П, T)} = 0,01615$; $\gamma_{R(1)}^{-(П, T)} = 4,32031 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_{R(2)}^{-(П, T)} = 7,07007 \cdot 10^{-6}$
$\rho_R^{-(П, T)}$	$\rho_{R(0)}^{-(П, T)} = 1,0$; $\rho_{R(1)}^{-(П, T)} = 0,26748$; $\rho_{R(2)}^{-(П, T)} = 4,37725 \cdot 10^{-4}$
D_a	0,01491
$R_k^{(П, T)}$	0,62263
$\lambda_k^{(П, T)}$	0,4738

Таблиця А.5

Оцінка характеристики працездатності ВС трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(BC, T)}$	{21, 21, 33, 17, 14, 21, 16, 13, 14, 16, 23, 15}
$R^{(BC, T)}$	{0,81416; 0,81416; 0,70796; 0,84956; 0,87611; 0,81416; 0,85841; 0,88496; 0,87611; 0,85841; 0,79646; 0,86726}
$\mu_R^{-(BC, T)}$	0,83481

Продовження табл. А5

Параметр	Числове значення
$\hat{R}^{(BC, T)}$	$\{-0,02065; -0,02065; -0,12684; 0,01475; 0,0413; -0,02065; 0,0236; 0,05015; 0,0413; 0,0236; -0,03835; 0,03245\}$
$\gamma_R^{-(BC, T)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(BC, T)} = 2,26242 \cdot 10^{-3}; \quad \gamma_{R(1)}^{-(BC, T)} = 2,29407 \cdot 10^{-4};$ $\gamma_{R(2)}^{-(BC, T)} = -1,94917 \cdot 10^{-4}$
$\rho_R^{-(BC, T)}$	$\rho_{R(0)}^{-(BC, T)} = 1,0; \quad \rho_{R(1)}^{-(BC, T)} = 0,1014; \quad \rho_{R(2)}^{-(BC, T)} = -0,08615$
D_a	$2,2369 \cdot 10^{-3}$
$R_k^{(BC, T)}$	0,88965
$\lambda_k^{(BC, T)}$	0,11693

Таблиця А.6

Оцінка характеристики працездатності НС трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(HC, T)}$	$\{21, 15, 11, 22, 14, 23, 13, 13, 12, 13, 10, 22\}$
$R^{(HC, T)}$	$\{0,81416; 0,86726; 0,90265; 0,80531; 0,87611; 0,79646; 0,88496; 0,88496; 0,89381; 0,88496; 0,9115; 0,80531\}$
$\mu_R^{-(HC, T)}$	0,86062
$\hat{R}^{(HC, T)}$	$\{-0,04646; 0,00664; 0,04204; -0,05531; 0,01549; -0,06416; 0,02434; 0,02434; 0,03319; 0,02434; 0,05088; -0,05531\}$
$\gamma_R^{-(HC, T)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(HC, T)} = 1,65929 \cdot 10^{-3}; \quad \gamma_{R(1)}^{-(HC, T)} = -4,66773 \cdot 10^{-4};$ $\gamma_{R(2)}^{-(HC, T)} = 2,43754 \cdot 10^{-4}$
$\rho_R^{-(HC, T)}$	$\rho_{R(0)}^{-(HC, T)} = 1,0; \quad \rho_{R(1)}^{-(HC, T)} = -0,28131; \quad \rho_{R(2)}^{-(HC, T)} = 0,1469$
D_a	$1,53765 \cdot 10^{-3}$
$R_k^{(HC, T)}$	0,91969
$\lambda_k^{(HC, T)}$	0,08372

Таблиця А.7

Оцінка характеристики працездатності Д трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(Д, Т)}$	{42, 30, 56, 51, 39, 30, 32, 14, 17, 40, 42, 14}
$R^{(Д, Т)}$	{0,62832; 0,73451; 0,5044; 0,54867; 0,65487; 0,73451; 0,71681; 0,87611; 0,84956; 0,64602; 0,62832; 0,87611}
$\mu_R^{-(Д, Т)}$	0,69985
$\hat{R}^{(Д, Т)}$	{- 0,07153; 0,03466; - 0,19543; - 0,15118; - 0,04499; 0,03466; 0,01696; 0,17625; 0,14971; - 0,05383; - 0,07153; 0,17625}
$\gamma_R^{-(Д, Т)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(Д, Т)} = 0,01362$; $\gamma_{R(1)}^{-(Д, Т)} = 3,5164 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_{R(2)}^{-(Д, Т)} = -9,50979 \cdot 10^{-4}$
$\rho_R^{-(Д, Т)}$	$\rho_{R(0)}^{-(Д, Т)} = 1,0$; $\rho_{R(1)}^{-(Д, Т)} = 0,25819$; $\rho_{R(2)}^{-(Д, Т)} = -0,06982$
D_a	0,01258
$R_k^{(Д, Т)}$	0,87722
$\lambda_k^{(Д, Т)}$	0,13099

Таблиця А.8

Оцінка характеристики працездатності ДГ трамваїв

Параметр	Числове значення
$n_f^{(ДГ, Т)}$	{8, 6, 14, 14, 7, 15, 8, 6, 2, 7, 4, 8}
$R^{(ДГ, Т)}$	{0,9292; 0,9469; 0,87611; 0,87611; 0,93805; 0,86726; 0,9292; 0,9469; 0,9823; 0,93805; 0,9646; 0,9292}
$\mu_R^{-(ДГ, Т)}$	0,92699
$\hat{R}^{(ДГ, Т)}$	{0,00221; 0,01991; - 0,05088; - 0,05088; 0,01106; - 0,05973; 0,00221; 0,01991; 0,05531; 0,01106; 0,03761; 0,00221}
$\gamma_R^{-(ДГ, Т)}$	$\gamma_{R(0)}^{-(ДГ, Т)} = 1,1894 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_{R(1)}^{-(ДГ, Т)} = 2,29159 \cdot 10^{-4}$; $\gamma_{R(2)}^{-(ДГ, Т)} = 2,63333 \cdot 10^{-4}$

Продовження табл. А8

Параметр	Числові значення
$\rho_R^{-(\text{ДГ}, T)}$	$\rho_{R(0)}^{-(\text{ДГ}, T)} = 1,0;$ $\rho_{R(1)}^{-(\text{ДГ}, T)} = 0,19267;$ $\rho_{R(2)}^{-(\text{ДГ}, T)} = 0,2214$
D_a	$1,1537 \cdot 10^{-3}$
$R_k^{(\text{ДГ}, T)}$	0,96939
$\lambda_k^{(\text{ДГ}, T)}$	0,05359

Додаток Б. Результати розрахунків визначення резервів запасних комплектів для основних функціональних систем трамваїв

Таблиця Б.1

Розрахунок запасних комплектів систем трамваїв

Сис-теми	Параметри						
	$\lambda^{(\bullet)}$, місяць ⁻¹	$\tau_c^{(\bullet)}$, год.	$\tau^{(\bullet)}$, год.	$\Theta^{(\bullet)}$	$Z_{\text{ср}}^{(\bullet)}$, компл.	$R_z^{(\bullet)} < R_{z \text{ доп}}^{(\bullet)}$	$z^{(\bullet)}$, компл.
РКС	0,3908	8,94	5,53	0,833	1,0108	0,0038	5
ГС	0,105	17,33	51,6	0,982	1,1736	0,0013	6
ТД	0,0378	55	14,58	0,995	0,4363	0,0011	4
ДГ	0,0536	97,29	29,16	0,99	1,1086	0,001	6
П	0,4738	88,09	38,52	0,942	15,6843	0,0027	28
Д	0,1309	13,62	4,5	0,983	0,3801	0,0006	4
ВС	0,1169	6,01	3,6	0,846	0,1777	0,0008	3
НС	0,0837	8,55	5,13	0,845	0,1813	0,0009	3

**Мокін Борис Іванович
Розводюк Михайло Петрович**

**Математичні моделі та системи технічної діагностики
основних електротехнічних систем міських трамваїв**

Монографія

Редактор Т.А. Ягельська
Оригінал-макет підготовлено М.П. Розводюком

Видавництво ВНТУ „УНІВЕРСУМ-Вінниця”
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, головний корпус, к. 114

Підписано до друку 10.12.2004 р.
Формат 29,7 x 42 ¼ Папір офсетний
Гарнітура Time New Roman
Друк різнографічний Ум. друк. арк.
Наклад 100 прим. Зам № 2004-210

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, головний корпус, к. 114
Тел.: (0432) 44-01-59